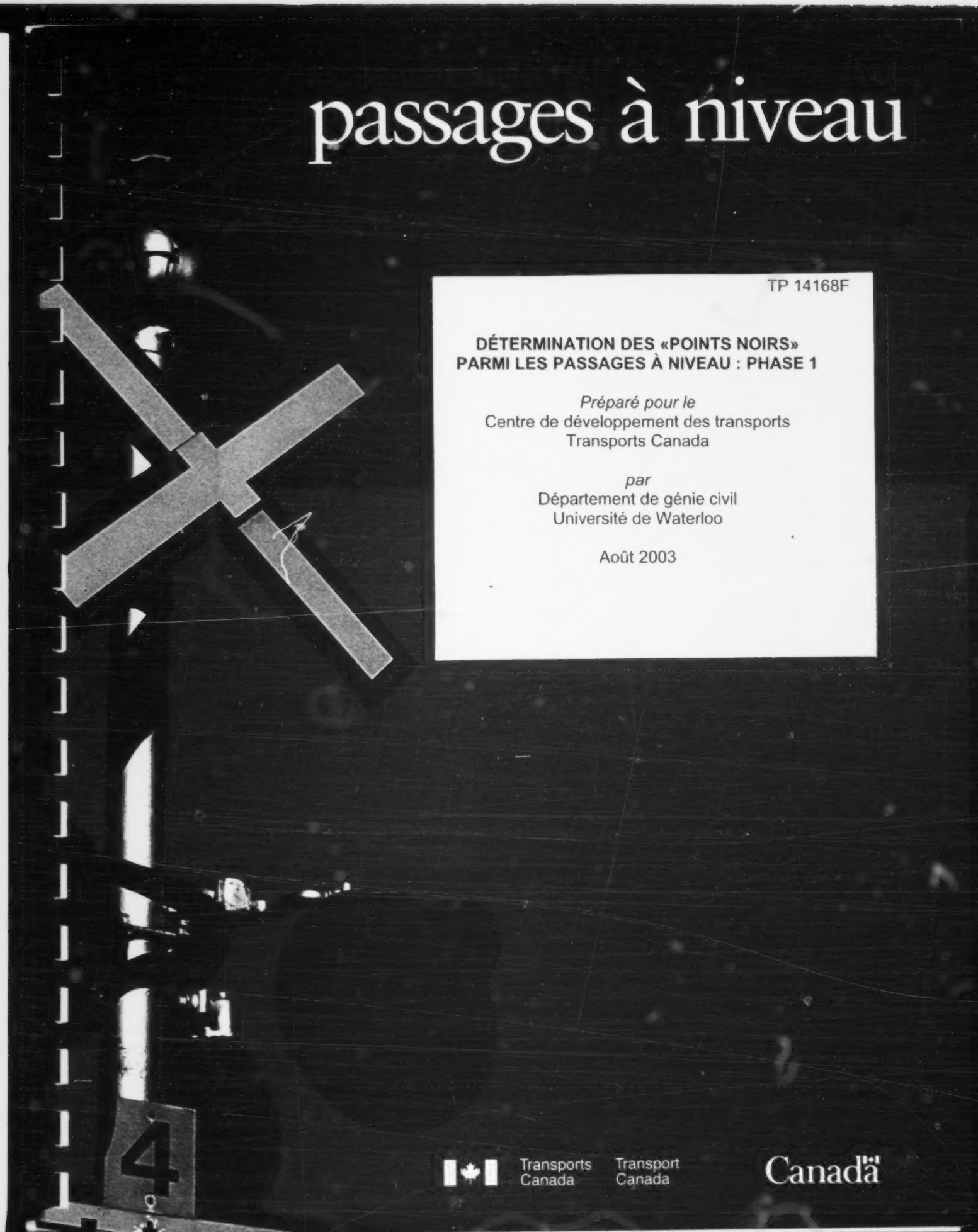
passages à niveau



TP 14168F

DÉTERMINATION DES «POINTS NOIRS» PARMI LES PASSAGES À NIVEAU : PHASE 1

Préparé pour le
Centre de développement des transports
Transports Canada

par
Département de génie civil
Université de Waterloo

Août 2003

Transports Canada Transport Canada

Canada

104-07465/

TP 14168F

DÉTERMINATION DES «POINTS NOIRS» PARMI LES PASSAGES À NIVEAU : PHASE 1

Préparé pour le
Centre de développement des transports
Transports Canada

par
Département de génie civil
Université de Waterloo

Août 2003

TP 14168F

DÉTERMINATION DES «POINTS NOIRS» PARMI LES PASSAGES À NIVEAU : PHASE 1

par

Frank Saccomanno, Liping Fu, Congming Ren et Luis Miranda
Département de génie civil
Université de Waterloo

Août 2003

Les opinions et les vues exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles du Centre de développement des transports de Transports Canada, du Comité directeur ou des organismes parrains.

Le Centre de développement des transports n'a pas l'habitude de citer des noms de produits ou de fabricants. S'il le fait ici, c'est simplement pour la bonne compréhension du texte.

Dans ce rapport, la vitesse des trains est exprimée en milles à l'heure (mi/h) et celle des véhicules routiers en kilomètres à l'heure (km/h), conformément à l'usage établi à Transports Canada.

Équipe de recherche

Frank Saccomanno
Liping Fu
Congming Ren
Luis Miranda

PARTENAIRES FINANCIERS

Programme de recherche sur les passages à niveau de Direction 2006

Transports Canada
Association des chemins de fer du Canada
Canadien National
Canadien Pacifique
VIA Rail Canada Inc.
Alberta Transportation
Ministère des Transports de l'Ontario
Ministère des Transports du Québec

This report is also available in English under the title *«Identifying Highway-Railway Grade Crossing Black Spots: Phase 1»*, TP 14168E.

Transports Canada Transport Canada

FORMULE DE DONNÉES POUR PUBLICATION

1. N° de la publication de Transports Canada	2. N° de l'étude	3. N° de catalogue du destinataire
TP 14168F	5145	

4. Titre et sous-titre	5. Date de la publication
Détermination des «points noirs» parmi les passages à niveau : Phase 1	Août 2003
	6. N° de document de l'organisme exécutant

7. Auteur(s)	8. N° de dossier - Transports Canada
F. Saccomanno, L. Fu, C. Ren et L. Miranda	2450-D-718-14

9. Nom et adresse de l'organisme exécutant	10. N° de dossier - TPSGC
Université de Waterloo Département de génie civil 200 University Avenue West Waterloo, Ontario Canada N2L 3G1	MTB-1-01172
	11. N° de contrat - TPSGC ou Transports Canada
	T8200-011518/001/MTB

12. Nom et adresse de l'organisme parrain	13. Genre de publication et période visée
Centre de développement des transports (CDT) 800, boul. René-Lévesque Ouest Bureau 600 Montréal (Québec) H3B 1X9	Final
	14. Agent de projet
	P. Lemay

15. Remarques additionnelles (programmes de financement, titres de publications connexes, etc.)

Coparrainé par les partenaires financiers du Programme de recherche sur les passages à niveau de Direction 2006 : Association des chemins de fer du Canada, Canadien National, Canadien Pacifique, Via Rail Canada Inc., Alberta Transportation, le ministère des Transports de l'Ontario et le ministère des Transports du Québec

16. Résumé

Le rapport présente un modèle fondé sur l'appréciation du risque pour la détermination des passages à niveau à haut risque, dits «points noirs», au Canada. Ce modèle comporte deux volets : 1) la prévision de la fréquence des collisions et 2) la prévision des conséquences des collisions. Sur un graphique, on a déterminé les passages à niveau qui posent un risque inacceptable (en raison de la fréquence prévue des collisions et/ou des conséquences prévues de celles-ci). Ce sont ces passages à niveau qui sont appelés «points noirs». Le modèle a été appliqué aux données du Système intégré d'information ferroviaire (SIIF) et à la base de données des événements ferroviaires (BDEF) couvrant la période de 1993 à 2001. Des équations de la fréquence des collisions suivant la loi de Poisson et la loi binomiale négative (BN) ont été définies, pour des passages à niveau munis de trois types de systèmes d'avertissement (panneaux indicateurs, feux clignotants et/ou barrières). Les deux modèles ont montré un bon ajustement aux données sur la fréquence des collisions.

Par ailleurs, une cote pondérée des conséquences a été définie, pour exprimer la gravité des conséquences combinées d'une collision. Les facteurs de pondération de cette cote ont été établis d'après les indemnités versées par les assureurs par suite des morts, blessures et dommages matériels résultant des collisions. Une équation BN des conséquences des collisions a ainsi été définie.

La répartition spatiale des «points noirs» est examinée, selon le type de système d'avertissement, les ajouts faits aux systèmes d'avertissement, l'emplacement géographique et les données historiques sur les collisions. Puis est dressée une liste des passages à niveau du Canada désignés «points noirs», c.-à-d. les passages à niveau pour lesquels le nombre de collisions prévu et/ou la cote de gravité prévue sont dépassés, étant donné des seuils de 0,1 p. 100. La répartition régionale de ces passages à niveau est analysée, selon un certain nombre de caractéristiques et les données historiques sur les collisions. Une plate-forme SIG a été élaborée pour la région de l'Ontario. Elle est utilisée pour illustrer la répartition spatiale de la fréquence prévue et observée des collisions, et des points noirs connexes.

17. Mots clés	18. Diffusion
Chemin de fer, passage à niveau, modèle fondé sur l'appréciation du risque, modèle de prévision des conséquences des collisions, prévision de la fréquence des collisions, points noirs, passage à niveau à haut risque	Le Centre de développement des transports dispose d'un nombre limité d'exemplaires.

19. Classification de sécurité (de cette publication)	20. Classification de sécurité (de cette page)	21. Déclassification (date)	22. Nombre de pages	23. Prix
Non classifiée	Non classifiée	—	xiv, 70, ann.	Port et manutention

Transport Canada / Transports Canada

PUBLICATION DATA FORM

1. Transport Canada Publication No.	2. Project No.	3. Recipient's Catalogue No.
TP 14168F	5145	

4. Title and Subtitle	5. Publication Date
Détermination des «points noirs» parmi les passages à niveau : Phase 1	August 2003
	6. Performing Organization Document No.

7. Author(s)	8. Transport Canada File No.
F. Saccomanno, L. Fu, C. Ren and L. Miranda	2450-D-718-14

9. Performing Organization Name and Address	10. PWGSC File No.
University of Waterloo Department of Civil Engineering 200 University Avenue West Waterloo, Ontario Canada N2L 3G1	MTB-1-01172
	11. PWGSC or Transport Canada Contract No.
	T8200-011518/001/MTB

12. Sponsoring Agency Name and Address	13. Type of Publication and Period Covered
Transportation Development Centre (TDC) 800 René Lévesque Blvd. West Suite 600 Montreal, Quebec H3B 1X9	Final
	14. Project Officer
	P. Lemay

15. Supplementary Notes (Funding programs, titles of related publications, etc.)

Co-sponsored by the funding partners of the Direction 2006 Highway-Railway Grade Crossing Research program: Railway Association of Canada, Canadian National Railway, Canadian Pacific Railway, VIA Rail Canada Inc., Alberta Transportation, Ministry of Transportation of Ontario, and the ministère des Transports du Québec

16. Abstract

This report presents a risk-based model for identifying highway-railway grade crossing black spots in Canada. This model consists of two prediction components: 1) collision frequency and 2) collision consequence. A graphical approach is adopted to identify crossings with unacceptable risk (high expected frequencies and/or consequences). These crossings are referred to black spots. The model was applied to Canadian inventory (IRIS) and collision occurrence (RODS) data for the period 1993-2001. Poisson and Negative Binomial (NB) frequency prediction expressions were developed for crossings with three types of warning devices (crossings with signs, flashing lights and/or gates). Both Poisson and NB models were found to provide a good fit to the collision frequency data.

A weighted consequence score was introduced to represent combined collision severity. The weights used in this combined consequence score were obtained from reported insurance claims for fatalities, personal injuries and property damages. A NB expression was developed for the collision consequence model.

The spatial distribution of black spots is discussed with respect to the type of warning device, upgrades in warning device, geographical location, and historical collision occurrence. A list of black spot crossings is provided for the Canadian data based on crossings whose expected number of collisions and/or expected severity score is exceeded at least 0.1% of the time. The regional breakdown of these crossings is discussed with respect to a selected number of attributes and historical collision experience. A GIS platform was developed for the Ontario region and used to illustrate the spatial pattern of expected and historical collision frequency and associated black spots.

17. Key Words	18. Distribution Statement
Highway-railway, grade crossing, risk-based model, collision consequence model, collision frequency prediction, black spots, high-risk grade crossing	Limited number of copies available from the Transportation Development Centre

19. Security Classification (of this publication)	20. Security Classification (of this page)	21. Declassification (date)	22. No. of Pages	23. Price
Unclassified	Unclassified	—	xiv, 70, app.	Shipping/ Handling

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent remercier les membres du Comité directeur du projet pour les réflexions et les commentaires judicieux dont ils leur ont fait part tout au long de la recherche.

Comité directeur

Andrey, Jean	Université de Waterloo
Ayton, Mark	Ministère des Transports de l'Ontario
Caird, Jeff	Université de Calgary
Carroll, Anya	Volpe Center
Hammond, Shaun	Province de l'Alberta
Hill, Maury	Bureau de la sécurité des transports
Lafontaine, Daniel	Transports Canada
Lewis, Nathalie	Bureau de la sécurité des transports
McCauley, Bill	Transports Canada
Mitchell, Ron	Transports Canada
Nash, Bob	Canadien Pacifique Limitée
Rao, Allen	Volpe Center
Turgeon, René	Transports Canada

Les auteurs souhaitent également remercier Sesto Vespa et Paul Lemay, du Centre de développement des transports de Transports Canada et Ling Suen, consultante auprès de Transports Canada, pour leurs suggestions et leurs conseils éclairés. Les données utilisées pour cette recherche émanaient de Transports Canada et du Bureau de la sécurité des transports (par l'entremise de Michelle Laframboise et de Nathalie Lewis).

Cette étude a été réalisée dans le cadre du Programme de recherche sur les passages à niveau, une initiative coparrainée par Transports Canada, les grandes compagnies de chemin de fer canadiennes et les gouvernements de l'Alberta, de l'Ontario et du Québec. Ce programme est un volet de Direction 2006, un regroupement d'intervenants dont le but est de diminuer de moitié d'ici 2006 le nombre d'accidents survenant à des passages à niveau.

SOMMAIRE

La recherche propose une méthodologie pour déterminer les passages à niveau à haut risque (ou «points noirs») au Canada. Les points noirs sont des passages à niveau où le nombre prévu de collisions et/ou la gravité prévue des conséquences des collisions dépassent certains seuils préétablis. On obtient ces valeurs en appliquant un modèle à chaque passage à niveau.

Deux types de modèles de fréquence des collisions ont été élaborés et évalués : 1) un modèle unique, avec, comme variable indépendante, le système d'avertissement, et 2) trois modèles distincts, soit un pour chaque type de système d'avertissement (panneaux indicateurs, feux clignotants et/ou barrières). Pour chaque type de modèle, on a analysé une distribution de Poisson, une distribution binomiale négative et une distribution bayésienne empirique pour déterminer si elles représentent bien la variation dans les collisions observées. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec le modèle de Poisson, qui permet de recourir à des équations distinctes pour les différents types de systèmes d'avertissement.

Une cote combinée de conséquences a été établie, qui représente les conséquences équivalentes totales pouvant résulter d'une collision à un passage à niveau. Cette cote est définie comme la somme pondérée des morts, des blessures et des dommages matériels causés par une collision. Les facteurs de pondération ont été établis d'après les estimations de coûts publiées, associées à chaque niveau de gravité, selon une approche fondée sur la volonté de payer. Le modèle binomial négatif est celui qui représente le mieux la relation entre les cotes de gravité et les diverses caractéristiques associées aux passages à niveau et aux collisions.

Sur un graphique à deux dimensions, on a évalué le risque posé par les différents passages à niveau, selon la fréquence de collisions prévue et la cote de conséquences prévue associées à chacun. Le graphique du risque ainsi établi a servi à déterminer les points noirs en fonction d'un seuil donné en pourcentage. Les points noirs définis comme tels en raison de la fréquence des collisions se concentraient autour des zones urbaines des Prairies, où les débits de circulation routière se sont révélés les plus élevés. Quant aux points noirs attribuables à une cote de conséquences élevée, ils étaient largement répartis dans les zones rurales et urbaines de l'Ontario et du Québec.

TABLE DES MATIÈRES

1 INTRODUCTION 1
1.1 Objectif et portée de l'étude 2
1.2 Détermination des points noirs 4

2 RECHERCHE DOCUMENTAIRE 7
2.1 Prévision de la fréquence des collisions aux passages à niveau 7
2.1.1 Modèles du risque relatif ou d'indice de danger 8
2.1.2 Modèles du risque absolu 9
2.2 Méthodes utilisées pour prévoir les collisions train/véhicule 12
2.3 Modèles des conséquences des collisions 13
2.3.1 Modèle des conséquences US DOT (1987) 13
2.3.2 Modèles des conséquences des collisions routières 14
2.4 Facteurs de risque expliquant les collisions aux passages à niveau 14
2.4.1 Système d'avertissement 15
2.4.2 Caractéristiques liées à la route 15
2.4.3 Caractéristiques liées au chemin de fer 16
2.4.4 Caractéristiques liées au conducteur et au véhicule 17

3 SOURCES DES DONNÉES 19
3.1 Fichier SIIF 19
3.2 Base de données sur les événements ferroviaires (BDEF) 21
3.3 Regroupement des bases de données 22
3.4 Description des collisions 23
3.5 Description statistique 24

4 PRÉVISION DE LA FRÉQUENCE DES COLLISIONS 27
4.1 Applicabilité du modèle de prévision des collisions US DOT aux données canadiennes 27
4.2 Résultats des modèles de prévision des collisions 28
4.2.1 Fractionnement des données 28
4.2.2 Résultats des modèles de prévision des collisions 29
4.3 Ajustement bayésien empirique des résultats du modèle de Poisson 32
4.4 Analyse de sensibilité (modèle de Poisson) 34
4.4.1 Effet du système d'avertissement 35
4.4.2 Effet des caractéristiques liées à la route 36
4.4.3 Effet des caractéristiques liées au chemin de fer 38
4.4.4 La prévision de la fréquence des collisions – Résumé 40

5 PRÉVISION DES CONSÉQUENCES DES COLLISIONS 43
5.1 Application du modèle des conséquences US DOT aux données canadiennes 43
5.2 Modèle canadien de prévision des conséquences des collisions 43
5.2.1 Établissement d'une cote des conséquences 43
5.2.2 Fractionnement des données 45
5.2.3 Calage du modèle canadien de prévision des conséquences d'une collision 45
5.2.4 Ajustement bayésien empirique des résultats du modèle des conséquences de Poisson 47

6 DÉTERMINATION DES POINTS NOIRS ET ANALYSE 49
6.1 Détermination des points noirs – Méthode graphique 49
6.2 Choix du seuil 51
6.2.1 Examen des seuils 52
6.3 Caractéristiques moyennes des passages à niveau désignés points noirs 54
6.4 Examen des passages à niveau désignés points noirs 55

7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS 61
7.1 Conclusions 61
7.2 Recommandations 64

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE 67

ANNEXE A RÉPARTITION DE L'ÉCHANTILLON DES PASSAGES À NIVEAU TIRÉ DE LA BASE DE DONNÉES BDEF/SIIF SELON DIVERSES VARIABLES

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Tendances du nombre total de collisions, de collisions mortelles et de collisions avec blessures aux passages à niveau (1993-1999) 2
Figure 1.2 Méthode de détermination des points noirs 4
Figure 1.3 Détermination des points noirs en fonction du risque, pour un type de passage à niveau donné 5
Figure 4.1 Fractionnement des données sur les passages à niveau aux fins du calage et de la validation des modèles 29
Figure 4.2 Comparaison des modèles de Poisson, BE et US DOT 34
Figure 4.3(1) Rapport entre le ratio des collision prévues et le DJMA, pour trois types de systèmes d'avertissement 35
Figure 4.3(2) Rapport entre le ratio des collisions prévues et la limite de vitesse des trains, pour trois types de systèmes d'avertissement 35
Figure 4.4(1) Nombre de collisions prévues en fonction du DJMA, pour trois types de systèmes d'avertissement 37
Figure 4.4(2) Nombre de collisions prévues en fonction de la vitesse permise sur la route, pour trois types de systèmes d'avertissement 37
Figure 4.5(1) Nombre de collisions prévues en fonction de la limite de vitesse des trains, pour trois types de systèmes d'avertissement 39
Figure 4.5(2) Nombre de collisions prévues en fonction du nombre de trains par jour, pour trois types de systèmes d'avertissement 39
Figure 5.1 Fractionnement des données pour le modèle des conséquences ... 45
Figure 6.1 Détermination des points noirs (méthode graphique – fréquence des collisions et conséquences par collision) 50
Figure 6.2 Détermination des points noirs (méthode de l'indice de risque combiné) 51
Figure 6.3 Comparaison coûts-avantages (fréquence par année en fonction du nombre de points noirs) 53
Figure 6.4 Comparaison coûts-avantages (conséquences par collision en fonction du nombre de points noirs) 53
Figure 6.5 Comparaison coûts-avantages (risque par année en fonction du nombre de points noirs) 54
Figure 6.6 Points noirs situés en Ontario, au niveau de la municipalité, selon la fréquence prévue des collisions par année et les conséquences prévues par collision 58
Figure 6.7 Points noirs situés en Ontario, au niveau de la municipalité, selon les données historiques sur la fréquence et les conséquences des collisions 59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1	Coefficients du modèle de Coleman-Stewart	9
Tableau 2-2	Équations de prévision de base pour trois types de systèmes d'avertissement	11
Tableau 3-1	Comparaison des données relatives à l'échantillon choisi avec celles de la population totale des passages à niveau	22
Tableau 3-2	Variables explicatives et variables dépendantes	23
Tableau 3-3a	Répertoire des passages à niveau selon le système d'avertissement (2001)	24
Tableau 3-3b	Fréquence des collisions et conséquences (1993-2001)	24
Tableau 3-4	Description statistique des variables prédictives utilisées dans le modèle de prévision de la fréquence des collisions	25
Tableau 3-5	Description statistique des variables prédictives utilisées dans le modèle de prévision des conséquences des collisions	26
Tableau 4-1	Passages à niveau et collisions observés par type de système d'avertissement	29
Tableau 5-1	Résultats du modèle des conséquences de Poisson selon SAS	46
Tableau 5-2	Résultats du modèle des conséquences BN selon SAS	47
Tableau 6-1	Nombre de points noirs (selon la fréquence et les conséquences)	52
Tableau 6-2	Valeurs moyennes caractérisant les passages à niveau points noirs et les autres	54
Tableau 6-3	Liste des points noirs selon la fréquence prévue des collisions par année	56
Tableau 6-4	Liste des points noirs selon les conséquences prévues par collision	56
Tableau 6-5	Liste des points noirs selon les données historiques sur la fréquence des collisions (1997-2001)	57
Tableau 6-6	Liste des points noirs selon les données historiques sur les conséquences des collisions (1997-2001)	57
Tableau 7-1	Modèles de prévision de la fréquence des collisions	62

GLOSSAIRE

Angle d'intersection	Angle au point d'intersection entre la route et la voie ferrée. La convention veut que cet angle soit celui de la perpendiculaire à la voie par rapport à l'axe de la route.
Collision	Accident à déclaration obligatoire qui concerne habituellement, mais non exclusivement, un impact entre un train et un véhicule routier. Les accidents mettant en cause des piétons ne sont pas considérés comme des collisions.
Conséquences des collisions prévues	Cote de conséquences prévue, définie comme la somme pondérée des morts, des blessures et des dommages matériels résultant de chaque collision à un passage à niveau donné, telle que prédite par le modèle des conséquences.
Débit journalier moyen annuel (DJMA)	Quotient du nombre annuel de circulations routières par le nombre de jours de l'année, à un endroit donné.
Exposition à la circulation	Produit croisé obtenu en multipliant le DJMA par le nombre de trains par jour.
Fréquence de collisions prévue	Nombre de collisions que l'on s'attend à voir survenir à un passage à niveau donné, sur une période donnée. C'est la probabilité de collisions à long terme, telle qu'établie au moyen des modèles de fréquence.
Largeur de la surface de croisement	Largeur (en pieds) de la route au croisement d'une voie ferrée. La réglementation exige que la largeur de la chaussée et des accotements, mesurée sur l'approche routière, dépasse de 0,5 pi de chaque côté celle de la chaussée et des accotements mesurée ailleurs, sans jamais être inférieure à 8 pi. La distance est mesurée perpendiculairement à l'axe de la route.
Limite de vitesse des trains	Limite de vitesse que les trains sont tenus de respecter au franchissement du passage à niveau (mi/h).
Nombre de trains par jour	Somme des trains directs (trains de marchandises et trains de voyageurs) et des trains de manœuvre franchissant chaque jour un passage à niveau donné.
Nombre de voies ferrées	Nombre total de voies à un passage à niveau donné. Ces voies sont classées dans différentes catégories : voie principale simple, voie principale double, voie de service, voie de manœuvre, etc.

Passage à niveau automatisé	Passage à niveau équipé de dispositifs d'avertissement et/ou de signalisation routière automatiques, activés par la détection d'un train. Ces dispositifs émettent un message qui indique aux usagers de la route qu'un train approche. Lorsqu'un train est détecté, des circuits de voie déclenchent les dispositifs d'avertissement (feux clignotants et sonnerie, barrières automatiques, p. ex.).
Passage à niveau non automatisé	Passage à niveau équipé de dispositifs de signalisation, comme des panneaux indicateurs et des marques sur la chaussée, qui ne sont pas activés par les trains. Ces dispositifs dits «passifs» préviennent les automobilistes, cyclistes et piétons de la présence d'un passage à niveau et les incitent à la prudence.
Personnes en cause	Nombre total des occupants de tous les véhicules routiers en cause dans une collision.
Points noirs	Passages à niveau pour lesquels le risque de collision atteint un niveau inacceptable et où une intervention se justifie, habituellement du fait que les gains potentiels de sécurité dépassent le coût de l'intervention.
Régression binomiale négative (BN)	Suppose l'assouplissement de l'hypothèse du modèle de Poisson, selon laquelle moyenne = variance, la moyenne étant exprimée comme une fonction exponentielle du nombre de variables explicatives.
Régression de Poisson	Pose comme hypothèse que le nombre de collisions à un passage à niveau (fréquence de collisions) suit une distribution de Poisson. Une équation de régression logarithmique est habituellement établie pour la moyenne, ce qui est avantageux en ce que le nombre de collisions prévu est non négatif.
Risque	Selon la définition courante, produit obtenu en multipliant le nombre de collisions prévu par la cote de leurs conséquences prévues. Le risque peut être désigné par un indice (produit des deux termes) ou par un graphique de la fréquence prévue et des conséquences prévues, représentées sur l'un et l'autre axes.
Vitesse permise sur la route	Limite de vitesse que les véhicules routiers sont tenus de respecter au franchissement d'un passage à niveau (km/h).

1 INTRODUCTION

Les collisions aux passages à niveau préoccupent les organismes de réglementation, les administrations ferroviaires et le grand public. Chaque année au Canada, environ 50 personnes perdent la vie des suites d'une collision à un passage à niveau (Transports Canada, Faits liés à la sécurité ferroviaire, 1996). Comme l'illustre la figure 1.1, en 1999, le nombre total de collisions aux passages à niveau a diminué de 19 p. 100 par rapport à la moyenne des six années précédentes (1993-1999). Au cours de cette période, les moyennes annuelles de personnes tuées et blessées dans des collisions à des passages à niveau avaient relativement peu fluctuées, s'établissant à quelque 45 tués et 62 blessés. Mais, même s'il a fléchi, le nombre de collisions est encore trop élevé et il faut encore le réduire.

C'est avec cet objectif en tête qu'un groupe d'organismes fédéraux et provinciaux a lancé une initiative de longue haleine vouée à la sécurité ferroviaire, baptisée Direction 2006. Le but de Direction 2006 est de réduire d'au moins 50 p. 100 le nombre de collisions aux passages à niveau au Canada d'ici 2006. La question qui se pose est : quels sont les meilleurs moyens à prendre pour atteindre ce but?

Il existe au Canada plus de 20 000 passages à niveau publics (et presque autant de passages à niveau privés et de ferme), qui couvrent un large spectre de caractéristiques matérielles, de systèmes de protection et d'usages. Certains ne sont équipés que de croix de Saint-André réflectorisées, tandis que d'autres possèdent une panoplie de feux clignotants, feux en porte-à-faux et barrières. Il est possible de synchroniser ces dispositifs de protection avec les feux de circulation adjacents pour optimiser les débits et réduire les temps d'attente. Beaucoup de passages à niveau sont situés en zone rurale éloignée, où les débits de circulation routière et ferroviaire sont faibles. Ils ne sont généralement pas automatisés. Mais ces dernières années, nombre de ces passages à niveau ont été améliorés et dotés de dispositifs d'avertissement complètement automatisés, avec barrières médianes.

Les collisions aux passages à niveau ont tendance à se répartir sur un grand nombre de sites : peu de collisions (s'il en est) surviennent à un site donné au cours d'une année donnée. Alors, il serait à la fois trop coûteux et peu réaliste de vouloir améliorer la sécurité aux 20 000 passages à niveau en appliquant la même norme partout. Tout programme de sécurité doit donc, avant toute chose, recenser les passages à niveau où le risque de collision atteint un niveau inacceptable, et où les contre-mesures d'atténuation du risque sont le plus justifiées. Selon la convention, ces passages à niveau à haut risque sont désignés **points noirs**.

Un rapport récent préparé par le Transport Research Laboratory (TRL) pour le compte de la Banque mondiale concluait que le meilleur moyen de réduire le nombre de collisions aux passages à niveau est de concentrer ses interventions sur les points noirs (www.worldbank.org/html/fpd/transport). Comme ces endroits

sont associés au risque le plus élevé, il est permis de penser que les méthodes de dépistage des points noirs mèneront à une affectation optimale des budgets, toujours trop maigres, de sécurité. Le rapport du TRL souligne que lorsqu'on tente de résoudre tous les problèmes à la fois, il arrive souvent que le manque de fonds et d'autres ressources fasse en sorte que les problèmes les plus criants sont laissés de côté.

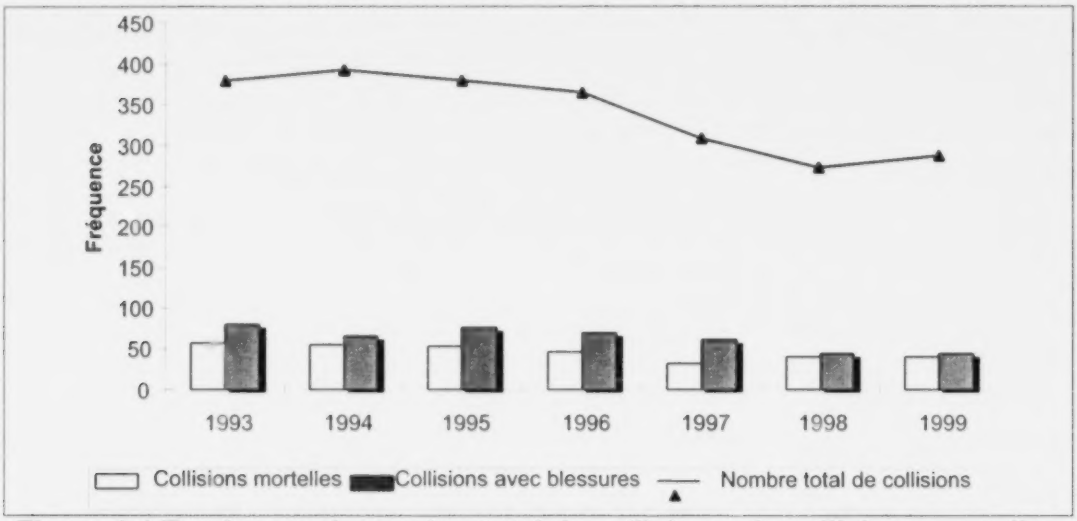


Figure 1.1 Tendances du nombre total de collisions, de collisions mortelles et de collisions avec blessures aux passages à niveau (1993-1999)
Source : Bureau de la sécurité des transports du Canada (1993 à 1999)

1.1 Objectif et portée de l'étude

Tout programme assujetti à l'objectif de Direction 2006 doit être considéré comme étant partie intégrante d'un **programme global et multidimensionnel de gestion de la sécurité**, qui comprend généralement quatre étapes interreliées :

1. Déterminer les passages à niveau où le risque de collisions atteint un niveau inacceptable;
2. Examiner les causes et les conséquences des collisions à ces endroits;
3. Mettre au point des contre-mesures économiques pour réduire le risque à ces passages à niveau dangereux;
4. Élaborer un programme global d'intervention en sécurité aux paliers régional et national, comportant l'établissement de priorités parmi les contre-mesures à appliquer aux passages à niveau à haut risque.

Toutes les étapes ci-dessus sont importantes. Mais le présent rapport aborde essentiellement la première étape, celle qui consiste à déterminer les passages à niveau qui présentent un risque élevé de collision dans le réseau ferroviaire canadien (dits «points noirs»).

Dans la présente étude, les termes «collisions» et «accidents» sont utilisés indifféremment, par souci de respecter les usages qui diffèrent d'une province ou d'un territoire à l'autre. Une collision s'entend d'un accident **à déclaration obligatoire** qui concerne habituellement, mais pas toujours, un impact entre un train et un véhicule routier. Seules sont prises en compte les collisions train-véhicule survenues à des passages à niveau publics, de compétence fédérale. Les collisions qui surviennent à des passages à niveau privés ou de ferme, et celles qui mettent en cause seulement des piétons dépassent la portée de la présente étude. Quant au risque, il renvoie autant à la probabilité d'une collision qu'à ses dommages consécutifs ou à sa gravité. Le risque potentiel, qui est au cœur de la présente analyse, représente la probabilité stable à long terme qu'un certain risque se matérialise à un passage à niveau donné au cours d'un intervalle de temps, et selon une certaine exposition. Souvent, le potentiel de collision diffère de l'expérience historique des collisions. Cet écart est dû au fait que les collisions sont des événements rares et aléatoires, qui fluctuent dans le temps. Le potentiel de collision résulte du lissage des variations annuelles du nombre de collisions enregistré à chaque passage à niveau.

L'étude poursuivait cinq objectifs précis :

1. Revue des méthodologies existantes de prévision du risque de collision aux passages à niveau, pour diverses variables et conditions.
2. Revue des méthodologies pour déterminer les points noirs et établir des priorités d'intervention en sécurité.
3. Élaboration d'un modèle «fondé sur l'appréciation du risque» pour cibler les passages à niveau dits «points noirs» qui ont le plus besoin d'une intervention en sécurité. Le risque renvoie ici autant au potentiel de collision à un passage à niveau précis (fréquence) qu'à la gravité potentielle d'une telle collision (p. ex., morts, blessures, dommages matériels). Le modèle comprend également des mesures objectives de seuils de risque aux fins de l'établissement des priorités d'intervention.
4. Application du modèle aux passages à niveau du Canada, à l'échelle régionale et nationale, de façon à dresser une liste, par priorité, des points noirs où une intervention en sécurité s'impose.
5. Analyse des principales caractéristiques de ces points noirs (géométrie, systèmes d'avertissement, caractéristiques opérationnelles); estimation du nombre de collisions passées, et de leurs conséquences, qui seraient signalées par le modèle proposé.

L'étude se limite à l'analyse du risque prévu de collision à chaque passage à niveau. Sont exclus de cette analyse les quasi-accidents, car ils ne sont normalement pas déclarés aux fins des rapports d'incidents. Les quasi-accidents sont des manquements à la sécurité qui n'entraînent pas de collision réelle.

1.2 Détermination des points noirs

La méthode utilisée pour déterminer les points noirs est illustrée à la figure 1.2. Cette méthode comprend trois composantes interreliées :

1. prévision de la fréquence (du risque) de collision
2. prévision des conséquences ou de la gravité des collisions
3. définition de seuils pour déterminer les points noirs et la nécessité d'intervenir

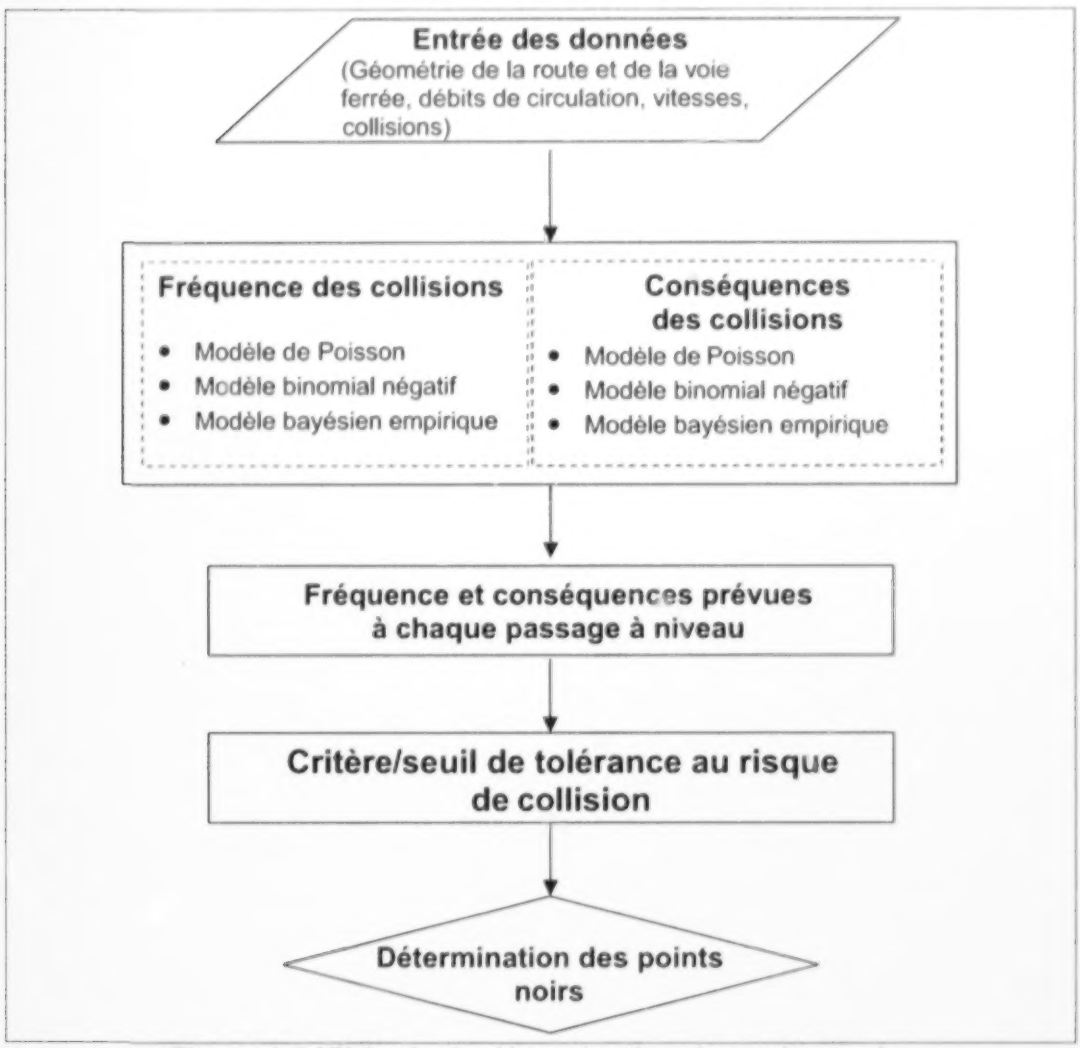


Figure 1.2 Méthode de détermination des points noirs

La figure 1.3 présente un graphique de délimitation du risque qui met en rapport la fréquence et les conséquences prévues, étant donné le seuil de tolérance au risque choisi. Cette mise en rapport conduit à la détermination des points noirs.

L'axe des «y» représente le **potentiel de collisions** à un passage à niveau donné (probabilité de collisions à long terme) pendant une période donnée. L'axe des «x» représente le **nombre de victimes (morts et blessés) et les dommages matériels prévus** à la suite de ces collisions. Autrement dit, plus on s'éloigne de l'origine sur chaque axe, plus le risque est grand. Les points noirs sont définis comme les passages à niveau où les risques prévus (fréquence et/ou conséquences) sont indûment élevés. La zone grise englobe les passages à niveau où le risque n'est pas acceptable mais où une intervention ne serait pas justifiée, en raison de coûts trop élevés.

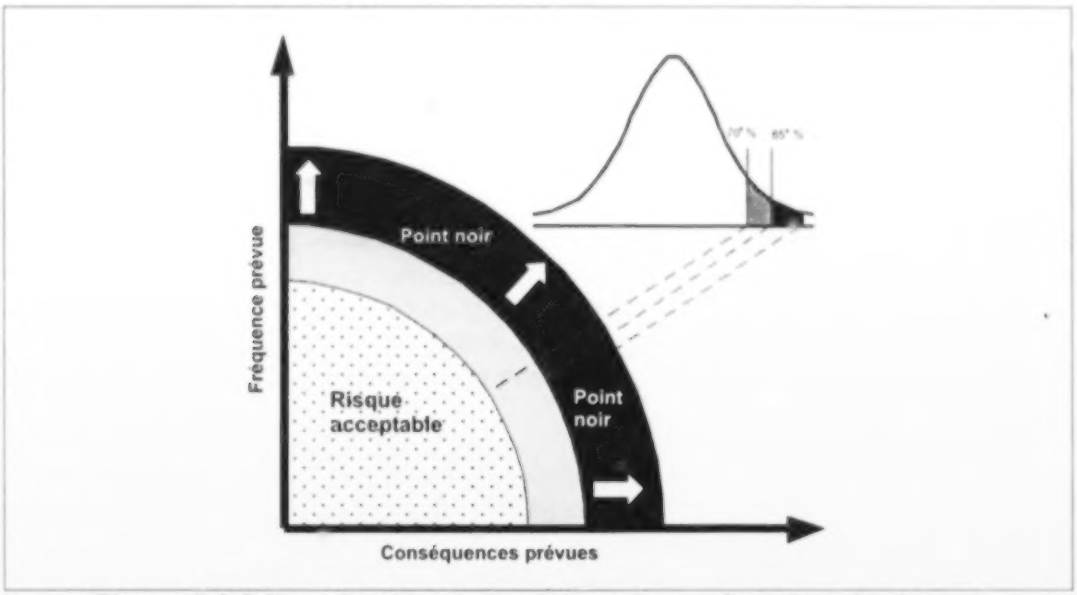


Figure 1.3 Détermination des points noirs en fonction du risque, pour un type de passage à niveau donné

Il est essentiel, pour déterminer les points noirs, d'avoir une définition objective de la tolérance au risque ou du seuil de risque auquel seront assujetties les décisions. Par exemple, si le risque dépasse un seuil donné, un certain type d'intervention devrait être envisagé. La tolérance au risque peut être décrite comme une courbe de valeurs limites qui se superpose aux estimations du risque à un passage à niveau (comme à la figure 1.3). Tout passage à niveau où la fréquence de collisions prévue et les conséquences prévues d'une collision dépassent les seuils de risque acceptable devrait être désigné «point noir».

Si on se reporte à la figure 1.3, les passages à niveau dans la bande foncée seraient considérés comme à haut risque (points noirs), et une certaine forme d'intervention de sécurité y serait justifiée, même à un coût élevé. À toutes fins utiles, dans la figure 1.3, il n'existe pas de limite extérieure à la bande des points noirs, car il n'y a pas de limite supérieure au risque indûment élevé pouvant justifier une intervention de sécurité. Les passages à niveau compris dans la bande grise sont associés à un risque modéré, et une intervention y est justifiée à

L'axe des «y» représente le **potentiel de collisions** à un passage à niveau donné (probabilité de collisions à long terme) pendant une période donnée. L'axe des «x» représente le **nombre de victimes (morts et blessés) et les dommages matériels prévus** à la suite de ces collisions. Autrement dit, plus on s'éloigne de l'origine sur chaque axe, plus le risque est grand. Les points noirs sont définis comme les passages à niveau où les risques prévus (fréquence et/ou conséquences) sont indûment élevés. La zone grise englobe les passages à niveau où le risque n'est pas acceptable mais où une intervention ne serait pas justifiée, en raison de coûts trop élevés.

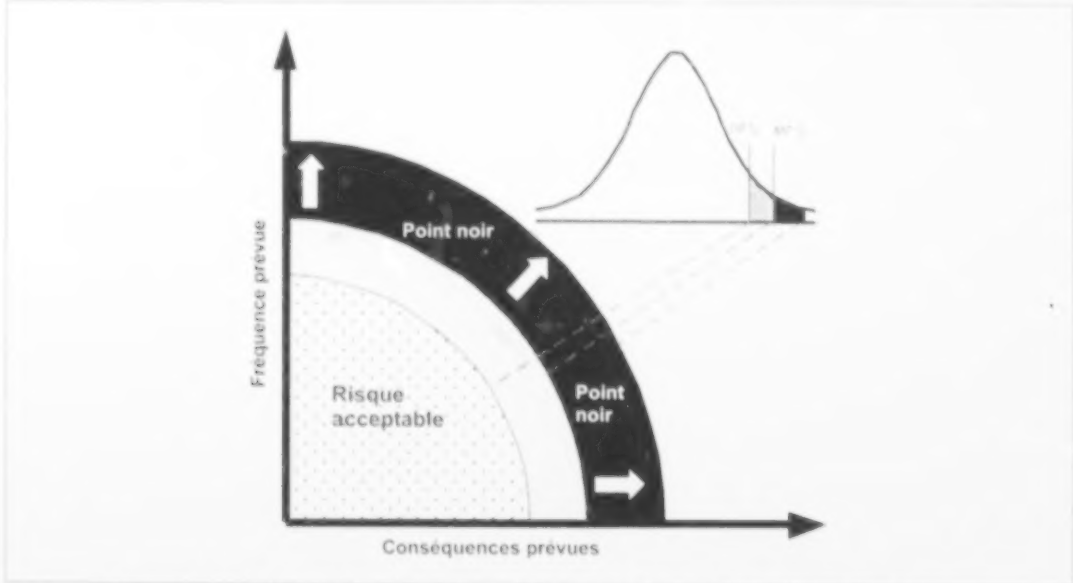


Figure 1.3 Détermination des points noirs en fonction du risque, pour un type de passage à niveau donné

Il est essentiel, pour déterminer les points noirs, d'avoir une définition objective de la tolérance au risque ou du seuil de risque auquel seront assujetties les décisions. Par exemple, si le risque dépasse un seuil donné, un certain type d'intervention devrait être envisagé. La tolérance au risque peut être décrite comme une courbe de valeurs limites qui se superpose aux estimations du risque à un passage à niveau (comme à la figure 1.3). Tout passage à niveau où la fréquence de collisions prévue et les conséquences prévues d'une collision dépassent les seuils de risque acceptable devrait être désigné «point noir».

Si on se reporte à la figure 1.3, les passages à niveau dans la bande foncée seraient considérés comme à haut risque (points noirs), et une certaine forme d'intervention de sécurité y serait justifiée, même à un coût élevé. À toutes fins utiles, dans la figure 1.3, il n'existe pas de limite extérieure à la bande des points noirs, car il n'y a pas de limite supérieure au risque indûment élevé pouvant justifier une intervention de sécurité. Les passages à niveau compris dans la bande grise sont associés à un risque modéré, et une intervention y est justifiée à

condition que les gains de sécurité potentiels l'emportent sur le coût de l'intervention. Les passages à niveau qui se situent dans la zone pointillée de la figure 1.3 seraient considérés acceptables, c.-à-d. ne nécessitant aucune intervention. Cette démarche fut celle de la Health and Safety Commission du Royaume-Uni (HSC, 1991) dans son étude marquante sur les risques associés au transport routier et ferroviaire de substances dangereuses au Royaume-Uni.

Aux fins de la présente étude, le graphique ci-dessus nécessiterait une analyse statistique approfondie tant de la fréquence que des conséquences (gravité) prévues des collisions, pour établir des seuils objectifs de tolérance. Mais en l'absence d'une étude approfondie de la tolérance au risque, nous avons exprimé ces seuils en centiles (90^e, 95^e, 99^e, etc.) pour la fréquence et les conséquences prévues des collisions, pour les différentes catégories de passages à niveau dans le réseau ferroviaire canadien. Ces seuils permettent de départager les passages à niveau où la fréquence ou les conséquences prévues sont dépassées, étant donné des seuils de 1 p. 100, 0,5 p. 100, etc., dans le réseau (passages à niveau publics municipaux et provinciaux).

2 RECHERCHE DOCUMENTAIRE

Ce chapitre passe en revue un certain nombre de modèles qui servent à prévoir le risque de collision et à déterminer les points noirs parmi les passages à niveau du Canada et des États-Unis. Le risque de collision renvoie à la fois au nombre prévu de collisions (la fréquence) et à leurs dommages consécutifs (la gravité). L'examen fait ressortir certaines variables indépendantes qui permettent d'expliquer la variabilité des valeurs de fréquence et de conséquences à un passage à niveau. Sont aussi recensées plusieurs études représentatives sur la détermination des points noirs dans les secteurs du transport routier et ferroviaire.

2.1 Prévision de la fréquence des collisions aux passages à niveau

Divers modèles de fréquence des collisions ont été élaborés au cours des dernières décennies. Ces modèles adoptent généralement l'une ou l'autre de deux grandes perspectives, celle du risque absolu et/ou celle du risque relatif. Les modèles du risque absolu produisent le «nombre prévu de collisions» à un passage à niveau donné au cours d'une période donnée. Les modèles du risque relatif, par contre, donnent un «indice de danger», qui représente le risque relatif (fréquence et/ou conséquences) que pose un passage à niveau par rapport à un autre.

Les modèles types de prévision des collisions fondés sur le risque absolu ont été élaborés par Coleman-Stewart (1976) et le Département des Transports des États-Unis (US DOT) (Farr, 1987). Le modèle US DOT fait généralement autorité dans l'industrie pour l'évaluation du risque de collision aux passages à niveau. De nombreux modèles du risque relatif ou d'indice de danger ont été élaborés aux États-Unis de 1950 à 1970 : la formule du Mississippi (1970), la formule du New Hampshire (1971), la méthode de l'Ohio (1959), la méthode du Wisconsin (1974), la méthode du Contra Costa County (1969), la méthode de l'Oregon (1956), le système de cotation du Dakota du Nord (1965), la formule de l'Idaho (1964), la formule de l'Utah (1971) et la formule de la ville de Détroit (1971).

Nous exposerons ici deux modèles du «risque relatif» représentatifs (ceux de l'Ohio [1959] et de la ville de Détroit [1971]) et deux modèles du «risque absolu» représentatifs (ceux de Coleman-Stewart [1976] et du US DOT [Farr, 1987]).

2.1.1 Modèles du risque relatif ou d'indice de danger

Formule de l'Ohio (1959)

Le modèle de l'Ohio s'exprime comme suit :

$$H.I. = A_f + B_f + G_f + L_f + N_f + SDR \qquad \textbf{(2.1)}$$

Où :
- $H.I.$ = indice de danger
- A_f = facteur de la probabilité de collision
- B_f = facteur de la limite de vitesse des trains
- G_f = facteur du gradient d'approche
- L_f = facteur de l'angle d'intersection
- N_f = facteur du nombre de voies ferrées
- SDR = catégorie de distance de visibilité

Formule de la ville de Détroit (1971)

Le modèle de la ville de Détroit se présente comme suit :

$$H.I. = \frac{T}{1000}\left[\frac{P}{10} + \frac{F}{20} + \frac{S}{30} * SDR + N_f + X_f + R_f\right](100\% - P_f\%) + 2A_e \qquad \textbf{(2.2)}$$

Où :
- T = nombre moyen de trains par jour
- P = nombre de trains de voyageurs par jour
- F = nombre de trains de marchandises par jour
- S = nombre de trains de manœuvre par jour
- SDR = catégorie de distance de visibilité
- N_f = facteur du nombre de voies ferrées
- X_f = facteur de l'état du passage à niveau
- R_f = facteur de l'approche routière
- P_f = facteur du système de protection
- Ae = facteur des collisions survenues

Les modèles du risque relatif (indice de danger) sont rarement utilisés pour justifier une intervention car ils ne débouchent pas sur les estimations objectives du risque nécessaires pour justifier économiquement l'intervention. C'est pourquoi ce type de modèle est peu utilisé pour la détermination des points noirs et les analyses connexes.

2.1.2 Modèles du risque absolu

On doit à Coleman-Stewart (1976) et au US DOT (Farr, 1987) les modèles du risque absolu de collision, qui s'énoncent comme suit :

Le modèle de Coleman-Stewart

Le modèle de Coleman-Stewart utilise une équation qui a la forme suivante :

$$Log\ H = C_0 + C_1\ LogC + C_2\ LogT + C_3\ (Log\ T)^2 \qquad \textbf{(2.3)}$$

Où : C = nombre de véhicules par jour
T = nombre de trains par jour
H = nombre moyen de collisions par passage à niveau par année

Coleman-Stewart a élaboré une série d'équations de la fréquence des collisions pour différentes catégories de passages à niveau (nombre de voies et région) et de systèmes d'avertissement (barrières, feux clignotants et croix de Saint-André). Les résultats sont résumés au tableau 2-1.

Tableau 2-1 Coefficients du modèle de Coleman-Stewart

Catégorie		C_0	C_1	C_2	C_3
Une seule voie, en zone urbaine	Barrières automatiques	-2,17	0,16	0,96	-0,35
	Feux clignotants	-2,85	0,37	0,16	-0,42
	Croix de Saint-André	-2,38	0,26	0,78	-0,18
Une seule voie, en zone rurale	Barrières automatiques	-1,42	0,08	-0,15	-0,25
	Feux clignotants	-3,56	0,62	0,92	-0,38
	Croix de Saint-André	-2,77	0,4	0,89	-0,29
Voies multiples, en zone urbaine	Barrières automatiques	-2,58	0,23	1,3	-0,42
	Feux clignotants	-2,5	0,36	0,68	-0,09
	Croix de Saint-André	-2,49	0,32	0,63	-0,02
Voies multiples, en zone rurale	Barrières automatiques	-1,63	0,22	-0,17	0,05
	Feux clignotants	-2,75	0,38	1,02	-0,36
	Croix de Saint-André	-2,39	0,46	-0,5	0,53

Le modèle US DOT exprime le nombre total de collisions prévu, ainsi que le nombre de collisions mortelles et le nombre de collisions avec blessures, en fonction de trois variables, soit la géométrie du passage à niveau (selon le répertoire de l'Association of American Railroads [AAR]), la signalisation routière et le débit de circulation. Ce modèle résulte de l'ajustement d'une équation non linéaire à plusieurs variables aux données historiques sur les collisions de la Federal Railroad Administration (FRA) et aux données du répertoire de l'AAR concernant les passages à niveau des États-Unis (Farr, 1987).

Le modèle US DOT comprend trois grandes composantes :

- modèle statistique de base
- ajustement externe subjectif pour les données historiques
- ajustement externe subjectif pour le type de système d'avertissement

Trois types de systèmes d'avertissement ont été pris en compte :

- type S (panneaux indicateurs ou croix de Saint-André)
- type F (panneaux indicateurs + feux clignotants)
- type G (panneaux indicateurs + feux clignotants + barrières)

On calcule le nombre prévu de collisions par année au passage à niveau j [$E(m_j)$] au moyen de l'équation suivante :

$$E(m_j) = b_j * [T_{0j} / (T_{0j}+T) * a_j + T / (T_{0j}+T) * (N/T)] \qquad \textbf{(2.4)}$$

Où : T = nombre d'années observées
N = nombre de collisions enregistrées en T années

Pour les différents types de passages à niveau, des facteurs d'ajustement (b_j) ont été appliqués au nombre de collisions prévu selon le modèle de base, de sorte que :

$b_j =$ 0,8644 pour dispositifs d'avertissement de type S : panneaux indicateurs seulement
0,8887 pour dispositifs d'avertissement de type F : panneaux + feux clignotants
0,8131 pour dispositifs d'avertissement de type G : panneaux + feux clignotants + barrières

Le terme a_j (équation 2.4) est le produit de l'équation multiplicative de la forme :

$$a_j = K_j * EI_j * DT_j * MS_j * MT_j * HP_j * HL_j \qquad \textbf{(2.5)}$$

Le terme a_j représente la composante statistique fondamentale du modèle de prévision des collisions US DOT et K_j, EI_j, DT_j, MS_j, MT_j, HP_j, HL_j sont les caractéristiques des passages à niveau calibrés initialement à l'aide d'une régression non linéaire à variables multiples appliquée aux bases de données de la FRA et de l'AAR sur les collisions et les passages à niveau aux États-Unis.

K_j = constante

Ei_j = facteur du coefficient d'exposition, qui est une fonction du débit journalier moyen annuel (DJMA) et du nombre de trains par jour, pour trois types de systèmes d'avertissement

DT_j = facteur des trains par jour, qui est une fonction du nombre de trains directs par jour, pour trois types de systèmes d'avertissement

MS_j = facteur de la vitesse maximale, qui est une fonction de la limite de vitesse des trains, pour trois types de systèmes d'avertissement

MT_j = facteur des voies principales, qui est une fonction du nombre de voies ferrées, pour trois types de systèmes d'avertissement

HP_j = facteur du revêtement, qui est une fonction de l'état de la chaussée (revêtue ou non), pour trois types de systèmes d'avertissement

HL_j = facteur des voies de circulation, qui est une fonction du nombre de voies tracées sur la chaussée, pour trois types de dispositifs d'avertissement

Le terme T_{0j} est calculé au moyen de l'équation :

$$T_{0j} = 1/(0.05+a_j) \qquad \textbf{(2.6)}$$

Le tableau 2-2 donne les estimations des divers paramètres, pour trois types de systèmes d'avertissement, obtenues par l'ajustement du modèle US DOT aux données sur les collisions et les passages à niveau aux États-Unis.

Tableau 2-2 Équations de prévision de base pour trois types de systèmes d'avertissement

Facteurs liés aux caractéristiques des passages à niveau							
Type de système d'avert.	**Cons-tante**	**Coefficient d'exposition**	**Trains directs/jour**	**Limite de vitesse des trains**	**Voies princi-pales**	**Revête-ment**	**Voies sur la route**
	K	**EI**	**DT**	**MS**	**MT**	**HP**	**HL**
Non automatisé	0,000694	$((c*t+0,2)/0,2)^{0,37}$	$((d+0,2)/0,2)^{0,178}$	$e^{(0,0077*ms)}$	1,0	$e^{(-0,5966*(hp-1))}$	1,0
Feux clignotants	0,000335	$((c*t+0,2)/0,2)^{0,41}$	$((d+0,2)/0,2)^{0,1131}$	1,0	$e^{(0,1917*mt)}$	1,0	$e^{(0,1826*(hl-1))}$
Barrières	0,000575	$((c*t+0,2)/0,2)^{0,29}$	$((d+0,2)/0,2)^{0,18}$	1,0	$e^{(0,1512*mt)}$	1,0	$e^{(0,1420*(hl-1))}$

Symboles :

c = nombre de véhicules routiers par jour

t = nombre de trains par jour

mt = nombre de voies principales

d = nombre de trains directs par jour, pendant les heures de clarté

hp = chaussée revêtue ou non (1 et 0)

ms = limite de vitesse des trains, selon l'indicateur, mi/h

h1 = nombre de voies tracées sur la chaussée

2.2 Méthodes utilisées pour prévoir les collisions train/véhicule

D'importantes recherches ont été réalisées ces 15 à 20 dernières années en vue de l'élaboration de différents types de modèles de prévision des accidents de la route. Ces recherches visaient principalement à établir un rapport statistique entre le risque de collision et divers facteurs tels que la géométrie de la route, le débit de circulation et l'exposition.

Les premiers modèles utilisaient des techniques de régression linéaire simple multidimensionnelle pour établir un rapport entre la géométrie de la route, les caractéristiques de la circulation et les collisions (Wright et Burnham, 1985). Malheureusement, la régression linéaire multidimensionnelle donnait de piètres résultats, car la relation sous-jacente s'est révélée être essentiellement non linéaire.

Certains chercheurs ont adopté des modèles linéaires généralisés (MLG) pour prévoir le risque de collision routière (Hauer et Persaud, 1987; Saccomanno et Buyco, 1988). La distribution de probabilités qui sous-tend ces modèles est soit celle de Poisson, soit la distribution binomiale négative. Les modèles de Poisson tentaient de rendre compte du caractère discret, non négatif et peu fréquent de ce phénomène que sont les collisions. Les techniques du maximum de vraisemblance sont utilisées pour obtenir les paramètres de meilleur ajustement du modèle. Dans ces modèles, le nombre prévu de collisions (par exposition) est exprimé comme une fonction linéaire de certains facteurs explicatifs à un endroit donné.

Une des contraintes associées aux modèles de Poisson, c'est que l'on considère que la moyenne (nombre prévu de collisions) est égale à la variance correspondante. Mais les recherches récentes sur la prévision des accidents routiers ont montré que cette assertion n'est pas toujours vraie, tout dépendant des observations, et qu'elle doit être examinée en fonction de différentes bases de données. Il existe en effet des bases de données dans lesquelles les données historiques sur les collisions font mentir l'hypothèse «moyenne égale variance» inhérente au modèle de Poisson : le modèle pourrait alors donner des résultats comportant une erreur de prévision significative.

Souvent, dans les bases de données de collisions routières, la variance de la fréquence des collisions est supérieure à la moyenne, ce qui indique que le modèle de Poisson sous-jacent n'est pas suffisamment explicatif. C'est ce qu'on appelle la surdispersion de Poisson. Certains chercheurs se sont intéressés à cette surdispersion des données relatives aux collisions routières ces dernières années. Miaou (1993) recommande d'utiliser le modèle binomial négatif, plus souple, pour pallier la surdispersion des données historiques. Bonneson (1993) et Daniel et coll. (2002) sont arrivés aux mêmes conclusions, à savoir que le modèle binomial négatif permet de se prémunir contre l'erreur de surdispersion associée aux modèles de Poisson.

Hauer et Persaud (1987) proposent une approche bayésienne empirique (BE) pour l'ajustement externe des estimations du modèle de Poisson d'après les données historiques sur les collisions. Le modèle BE doit être considéré comme complémentaire du modèle binomial négatif plutôt que comme son substitut. Le modèle BE est largement décrit dans la littérature en tant qu'outil pour prévoir la plupart des types d'événements rares. Saccomanno et coll. (2001) et Persaud (1990) ont eu recours à des modèles BE pour désigner des points noirs routiers.

2.3 Modèles des conséquences des collisions

2.3.1 Modèle des conséquences US DOT (1987)

Le modèle des conséquences des collisions entre trains et véhicules routiers utilisé par le US DOT (Farr, 1987) comprend deux niveaux de gravité : accidents mortels et accidents corporels. Pour les besoins de la cause, une seule perte de vie suffit pour classer une collision parmi les accidents mortels, tandis que les accidents corporels sont ceux où au moins une personne a été ou tuée ou blessée. Les deux types de collisions sont consignés dans les bases de données sur les incidents de la Federal Railway Administration (FRA). Dans le modèle des conséquences US DOT, les accidents mortels forment un sous-ensemble des accidents corporels.

Dans ce modèle, la probabilité d'un accident mortel (FA), étant donné la survenue préalable d'une collision (C), s'exprime comme suit :

$$P(FA/C) = 1/ (1 + KF \times MS \times TT \times TS \times UR) \quad \textbf{(2.7)}$$

Où : *KF* = 440,9, MS = $ms^{-0,9981}$, TT = $(tt + 1)^{-0,0872}$
TS = $(ts + 1)^{0,0872}$, UR = $e^{0,3571ur}$
MS = limite de vitesse des trains, selon l'indicateur
TT = trains directs par jour
TS = trains de manœuvre par jour
UR = passage à niveau urbain/rural, 0 pour rural et 1 pour urbain

La probabilité d'un accident corporel (CA), étant donné la survenue préalable d'une collision, s'exprime comme suit :

$$P(CA/C) = 1/(1+ KC \times MS \times TK \times UR) \quad \textbf{(2.8)}$$

Où : KC = 4,481
MS = $ms^{-0,343}$
TK = $e^{-0,1153tk}$
UR = $e^{0,3571ur}$
Tk = nombre total de voies ferrées

Pour calculer le nombre prévu d'accidents mortels et d'accidents corporels par passage à niveau, il faut multiplier le nombre prévu de collisions par la probabilité conditionnelle d'un accident mortel ou corporel, soit :

$$E\,(FA) = E[C] \times P(FC/C) \quad \textbf{(2.9)}$$
$$E\,(CA) = E[C] \times P(CA/C) \quad \textbf{(2.10)}$$

Il convient de noter que le modèle des conséquences US DOT ne tient pas compte du type de système d'avertissement dont est équipé un passage à niveau donné. De plus, le modèle traite tous les accidents mortels de la même manière, peu importe le nombre de personnes tuées. Il se concentre sur la probabilité d'une collision mortelle et/ou corporelle, non pas sur le nombre de personnes tuées ou blessées dans chaque collision. Il peut donc difficilement distinguer entre les niveaux de gravité de différentes collisions survenues à un même passage à niveau.

2.3.2 Modèles des conséquences des collisions routières

Il est proposé, dans la littérature, un certain nombre de méthodes statistiques pour prévoir la gravité ou les conséquences des collisions routières. Nassar et coll. (1994) ont proposé une série de modèles logit hiérarchiques séquentiels pour prévoir la gravité des blessures subies par les occupants de véhicules lors de collisions routières. Trois catégories de facteurs explicatifs sont pris en compte : facteurs physiques (dissipation d'énergie), état du conducteur et manœuvre effectuée par celui-ci, réponse passive de l'occupant (p. ex., portait-il une ceinture de sécurité? quelle place occupait-il dans le véhicule?). Comme le modèle de Nassar concerne essentiellement les occupants, la gravité d'une collision donnée se mesure par la somme de la gravité de l'accident pour tous les occupants de tous les véhicules en cause.

Certains auteurs suggèrent d'utiliser des modèles de régression log-linéaires plutôt que des modèles logit pour prévoir la gravité des collisions routières. Ils font valoir que les modèles logit ne permettent pas une prise en compte systématique des interactions entre les divers facteurs de risque indépendants. Parmi eux, Chen (1999) utilise un modèle log-linéaire pour évaluer les facteurs de risque qui influent sur la gravité des blessures des chauffeurs d'autobus. Il découvre ainsi d'importantes interactions entre la responsabilité de la collision, le moment de la collision et le type de collision, tous des facteurs qui influent sur la gravité de celle-ci. Il note la possibilité d'agréger différents niveaux de gravité en une seule valeur combinée qui peut être reliée aux facteurs de risque pour prévoir les conséquences globales d'une collision à un endroit (ou passage à niveau) donné.

2.4 Facteurs de risque expliquant les collisions aux passages à niveau

Les facteurs de risque sont les caractéristiques d'un passage à niveau qui expliquent la variation du risque de collision (fréquence et conséquences) à ce

passage à niveau. Nous nous pencherons ici sur les cinq grands facteurs de risque : système d'avertissement, débit journalier de circulation routière, largeur de la surface de croisement, nombre de voies ferrées, nombre de trains par jour, et caractéristiques liées au véhicule et au conducteur. L'exposition à la circulation, à un passage à niveau donné, est définie comme le produit croisé du débit journalier moyen annuel (DJMA) et du nombre de trains par jour.

2.4.1 Système d'avertissement

Le type de système d'avertissement a un effet sensible sur le risque aux passages à niveau (Farr, 1987). On considère en général qu'il existe deux types de systèmes d'avertissement : automatisés et non automatisés. Les systèmes non automatisés comprennent les panneaux indicateurs. Les systèmes automatisés comprennent les feux clignotants et/ou les barrières. Aux fins de la présente étude, tous les systèmes d'avertissement ont été classés dans ces trois grandes catégories.

La signalisation routière non automatisée (panneaux, marques sur la chaussée, lampadaires aux abords d'un passage à niveau) indique au conducteur qu'il s'approche d'un passage à niveau et l'incite à la prudence. Les dispositifs non automatisés n'informent pas les automobilistes de l'arrivée d'un train. Ces derniers doivent plutôt déterminer eux-mêmes si un train arrive et s'ils peuvent s'engager sur les voies en toute sécurité.

Les dispositifs automatisés indiquent clairement aux usagers qu'un train s'approche du passage à niveau. Lorsqu'un train est détecté, des circuits de voie déclenchent les dispositifs d'avertissement (feux clignotants et sonnerie, ou barrières automatiques). Il reste alors aux usagers à déterminer où se situe exactement le train par rapport au passage à niveau (p. ex., à 5 s, 10 s, 15 s de distance, etc.).

2.4.2 Caractéristiques liées à la route

Des recherches antérieures ont mis en lumière certaines caractéristiques liées à la route qui influent sur les collisions aux passages à niveau. Parmi ces caractéristiques figurent le débit de circulation, la vitesse des véhicules, le type de revêtement, la largeur de la surface de croisement, le nombre de voies ferrées, etc. Cette section résume les faits saillants concernant les effets des caractéristiques liées à la route sur les collisions aux passages à niveau.

Débit de circulation

Le débit de la circulation routière à un passage à niveau a un effet évident sur le risque de collision. Plus il y a de véhicules sur la route, plus il y a de véhicules exposés à entrer en conflit avec des trains, plus la probabilité de collision est grande. Dans certaines études antérieures, comme celle de Coleman-Stewart

(1976) et celle de Farr (1987) du US DOT, le débit de circulation apparaît comme une des variables importantes du modèle de prévision des collisions. Le débit de circulation est exprimé par le DJMA.

Largeur de la surface de croisement

La largeur de la surface de croisement influe à la fois sur les collisions véhicule-train et sur les collisions véhicule-véhicule. Cette largeur peut donner une idée du nombre de voies. Or, l'augmentation du nombre de voies se traduit par une augmentation du débit de circulation sur le passage à niveau et par un risque accru de collision. De plus, la visibilité, pour le conducteur, a tendance à diminuer à mesure que s'intensifie la circulation au passage à niveau.

La largeur de la surface de croisement renvoie à la largeur de la chaussée, en mètres, plus les accotements (0,5 mètre de chaque côté), mesurée sur l'approche routière. La distance est mesurée perpendiculairement à l'axe de la route.

2.4.3 Caractéristiques liées au chemin de fer

Le nombre de voies ferrées et le nombre de trains par jour sont les principales caractéristiques liées au chemin de fer qui influent sur le risque à un passage à niveau.

Nombre de voies ferrées

Les voies ferrées sont classées en plusieurs catégories (voie principale simple, voie principale double, voie de service, voie de manœuvre, etc.). Les voies principales sont habituellement fréquentées par des trains directs (en transit), tandis que les autres types de voies servent aux manœuvres ou aux mouvements en gare. Le nombre de voies influe sur la fréquence des collisions et sur leurs conséquences.

Angle d'intersection

Il s'agit de l'angle au point d'intersection entre la route et la voie ferrée. La convention veut que cet angle soit celui de la perpendiculaire à la voie par rapport à l'axe de la route. Les recherches antérieures donnent à penser que l'angle d'intersection a un léger effet sur la fréquence des collisions et sur leurs conséquences.

Nombre de trains par jour

Les trains sont classés en deux catégories, soit les trains directs (trains de marchandises et trains de voyageurs en transit) et les trains de manœuvre. Les caractéristiques liées au train, comme sa longueur, son poids, son système de freinage, sa vitesse, et le nombre de trains par jour influent sur la sécurité aux passages à niveau. Dans le modèle US DOT, outre l'exposition aux trains, qui est

considérée comme une variable influant à la fois sur la fréquence des collisions et sur leurs conséquences, le nombre de trains directs par jour s'est aussi révélé influer sur la fréquence des collisions.

Toujours dans le modèle US DOT, la vitesse du train s'est révélée influer à la fois sur la fréquence et sur les conséquences des collisions. Pour ce qui est des conséquences, l'augmentation de la limite de vitesse des trains se traduit par une augmentation de la gravité des collisions.

2.4.4 Caractéristiques liées au conducteur et au véhicule

Les caractéristiques liées au conducteur sont un élément clé pour expliquer la survenue de collisions aux passages à niveau. En effet, le temps pris par le conducteur pour prendre une décision et réagir, de même que sa capacité de juger de la vitesse du train et d'être attentif à plusieurs événements simultanés, sont tous des facteurs importants. Aux passages à niveau non automatisés, toute erreur et toute perception fautive de la part du conducteur peuvent mener à une collision. Les passages à niveau automatisés peuvent réduire les erreurs de reconnaissance, mais ils produisent d'autres fausses manœuvres de conduite.

Les passages à niveau sont exposés à divers véhicules, des motocyclettes aux tracteurs semi-remorques. Ces véhicules possèdent des caractéristiques diamétralement opposées, qui influent directement sur la sécurité aux passages à niveau. Autre caractéristique importante : la charge transportée par ces véhicules, qu'il s'agisse d'enfants, dans le cas des autobus scolaires, ou de matières dangereuses, dans le cas des camions. La vitesse du véhicule, ses dimensions et son poids, ses performances en accélération et au freinage sont autant d'attributs majeurs qui influent sur le risque aux passages à niveau. En moyenne, les poids lourds sont en cause dans 16 p. 100 de toutes les collisions aux passages à niveau.

3 SOURCES DES DONNÉES

Ce chapitre décrit les données utilisées pour élaborer les modèles de prévision du risque aux passages à niveau, modèles qui sont décrits aux chapitres quatre et cinq. Il présente les sources des données, leur regroupement aux fins de l'analyse, et les variables explicatives utilisées dans les modèles de prévision.

La présente étude utilise une combinaison du SIIF (Système intégré d'information ferroviaire) de Transports Canada (TC) et de la Base de données sur les événements ferroviaires (BDEF) du Bureau de la sécurité des transports (BST). Le fichier SIIF contient des données sur les quelque 29 500 passages à niveau répartis dans toutes les régions du Canada, de même que des renseignements sur la géométrie de la route et de la voie, le débit de circulation routière et certaines caractéristiques de fonctionnement des trains. Quant à la BDEF, elle contient des renseignements sur les collisions survenues à ces passages à niveau pendant la période de 1993 à 2001. La BDEF est constituée par le BST, tandis que TC est responsable du SIIF, qui porte sur les caractéristiques des passages à niveau. Ces deux bases de données partagent un même système de numéros de référence, ce qui permet de relier chaque collision aux passages à niveau publics, par municipalité et par province.

3.1 Fichier SIIF

Cette base de données renseigne sur la géométrie, la signalisation routière et le débit de circulation à chacun des 29 507 passages à niveau du Canada. Elle comprend six variables (la répartition de l'échantillon selon ces variables est donnée à l'annexe A).

Emplacement

Chaque passage à niveau compris dans l'ensemble de données correspond à une identification d'emplacement, qui indique la rue, la municipalité et la province où se trouve le passage à niveau. Voici comment se répartissent les 29 507 passages à niveau du Canada :

- 7 357 en Ontario
- 6 469 en Saskatchewan
- 4 127 au Québec
- 4 074 en Alberta
- 3 161 au Manitoba
- 2 185 en Colombie-Britannique
- 1 291 au Nouveau-Brunswick
- 809 en Nouvelle-Écosse
- 16 dans les Territoires du Nord-Ouest
- 9 à Terre-Neuve et au Labrador

- 8 au Yukon
- 1 à l'Île-du-Prince-Édouard

Type de système d'avertissement

La base de données comprend neuf types de systèmes d'avertissement :

1. Feux clignotants et sonnerie
2. Feux clignotants et sonnerie avec barrières
3. Feux de circulation
4. Feux clignotants, sonnerie et feux de circulation
5. Feux clignotants, sonnerie, barrières et feux de circulation
6. Panneaux indicateurs de passage à niveau (pendules avertisseurs ou croix de Saint-André)
7. Signaux et sonnerie
8. Barrières à commande manuelle
9. Panneau indicateur réflectorisé
10. Inconnu/renseignements non disponibles

Pour les besoins de la présente analyse, trois des neuf types de systèmes d'avertissement ont été pris en compte, soit des panneaux indicateurs seulement (S, type 9), des panneaux indicateurs et des feux clignotants (F, type 1), et des panneaux indicateurs, feux clignotants et barrières (G, type 2). À eux seuls, ces trois types comptent pour 77 p. 100 des 29 507 passages à niveau. Les autres n'ont pas été pris en compte car pour la plupart, le type de système d'avertissement n'est pas indiqué (inconnu).

Type de passage à niveau

Cinq types de passages à niveau sont pris en compte : public automatisé, public non automatisé, privé, de ferme, et saut-de-mouton. La présente étude s'est limitée aux passages à niveau publics (automatisés et non automatisés), qui représentent 77 p. 100 des passages à niveau au Canada.

Géométrie de la route

La base de données renseigne sur la géométrie des approches routières et sur le matériau de revêtement de la chaussée, la largeur de la surface de croisement (en pieds), la catégorie de la route et la vitesse permise sur la route (en km/h). Les routes sont classées dans neuf catégories : route de dégagement (grande voie de circulation), route collectrice, piste cyclable, chemin de ferme, route locale à faible débit, voie piétonne, chemin privé, piste de motoneige et route non ouverte. Les matériaux de revêtement comprennent notamment l'asphalte, le béton et le gravier. Les passages à niveau dont l'accès est interdit aux véhicules moteurs n'ont pas été pris en compte.

Géométrie de la voie ferrée

La base de données renseigne sur la géométrie de la voie ferrée et sur le nombre de voies, l'angle d'intersection, la limite de vitesse des trains (en mi/h), la limite de vitesse des trains de voyageurs (mi/h), la limite de vitesse des trains de marchandises (mi/h) et la limite de vitesse des trains de manœuvre (mi/h).

Débits de circulation

Les débits de circulation comprennent le DJMA et le nombre de trains par jour à chaque passage à niveau, et le nombre de trains de marchandises, de voyageurs et de manœuvre utilisant chaque jour le passage à niveau.

3.2 Base de données sur les événements ferroviaires (BDEF)

Les données sur les collisions ferroviaires colligées par le BST donnent une information détaillée sur chacune des collisions à être survenue aux plus de 29 000 passages à niveau situés sur le territoire canadien pendant la période de 1993 à 2001. La BDEF s'articule autour de quatre types de données :

- **Données de base sur les collisions**
  Ces données comprennent le numéro de référence de la collision, la date, l'heure et l'endroit où elle est survenue, les conditions météorologiques qui régnaient au moment de la collision, l'état de la chaussée (mouillée, sèche, glissante, couverte de neige/glace), la géométrie de la route et du chemin de fer, le débit de circulation routière, le nombre de trains par jour, etc. On y précise en outre le type d'impact, comme «véhicule heurté par train», «train heurté par véhicule» et «piéton heurté par train».

- **Conducteur et véhicule en cause**
  Ces données renseignent sur la manœuvre effectuée par le conducteur, la visibilité dont il disposait, son sexe, son âge, etc. La manœuvre du véhicule renvoie au comportement du conducteur juste avant la collision, comme : «a dérapé sur la voie», «a contourné le dispositif d'avertissement», «s'est arrêté et s'est remis en marche», «a omis de s'arrêter», «le moteur a calé sur la voie», «était immobilisé sur la voie», «s'est arrêté trop près de la voie», «a franchi les barrières», «n'a pas tenu compte du dispositif d'avertissement». Les données sur le véhicule renferment de l'information sur le type de véhicule (automobile, camion, ensemble tracteur et semi-remorque, autobus, véhicule d'urgence, motocyclette, etc.).

- **Personnes en cause**
  Il s'agit du nombre de véhicules en cause dans la collision et du nombre moyen d'occupants dans chaque véhicule. Cette information sert à obtenir une estimation du nombre total de personnes en cause dans chaque collision, estimation qui constitue une donnée d'entrée dans le modèle de prévision des conséquences.

- **Conséquences**
  Ces données renseignent sur le nombre de tués et de blessés graves, et sur l'ampleur des dommages matériels associés à chaque collision. Les numéros de référence des passages à niveau (TC_NO) sont communiqués, ce qui permet de relier les collisions au fichier des passages à niveau.

3.3 Regroupement des bases de données

La base de données BDEF/SIIF comprend de l'information sur les 29 507 passages à niveau du Canada, et sur les 2 905 collisions déclarées au cours de la période de 1993 à 2001. Dans le cas de certains passages à niveau, les données se sont avérées insuffisantes pour nos besoins, c.-à-d. qu'elles ne comprenaient pas les variables nécessaires à nos modèles. Ces passages à niveau ont donc été retirés de la base de données exploitable. Heureusement, la plupart de ces passages à niveau laissés de côté (en raison de données manquantes ou erronées) sont des passages à niveau privés ou réservés aux piétons/cyclistes. Ainsi, l'ensemble de données utilisé dans l'étude comprend des données rétrospectives sur les collisions et des données descriptives sur 10 381 passages à niveau utilisables au Canada, pour la période de 1993 à 2001. Les passages à niveau où les dispositifs d'avertissement ont été changés au cours de la période visée ont été pris en compte deux fois dans notre base de données (avant et après le changement), ce qui donne un total de 10 797 observations.

Le fait d'avoir écarté de notre analyse plus de la moitié des données initiales sur les passages à niveau ouvre la porte à un biais d'échantillonnage. Pour parer à cette difficulté, les valeurs moyennes de la vitesse du train, de la vitesse du véhicule routier, du nombre de trains par jour et du DJMA à certains passages à niveau ont été calculées et comparées aux valeurs moyennes établies pour la population totale. Les résultats de cette comparaison sont donnés au tableau 3-1. De faibles écarts sont notés, mais les deux ensembles de valeurs concordent en général.

Tableau 3-1 Comparaison des données relatives à l'échantillon choisi avec celles de la population totale des passages à niveau

	Vitesse train	Vitesse route	Nombre trains/jour	DJMA
Échantillon	41	59	10	1657
Total	37	57	7	1218

Comme les données sur les collisions et les caractéristiques des passages à niveau font partie de deux tables de données distinctes, les données sont reliées les unes aux autres au moyen des numéros de référence attribués aux passages à niveau (TC_NO). Des requêtes créées dans MS Access permettent de relier les deux bases de données.

Les bases de données ont ensuite été combinées, au moment de caler et valider les modèles de prévision de la fréquence des collisions et des conséquences qui font

l'objet du présent rapport. Dix variables explicatives, énumérées au tableau 3-2, ont été incluses dans ces modèles. La variable dépendante est le nombre prévu de collisions, dans le cas des modèles de fréquence, et la cote de conséquences prévue par collision, pour les modèles de conséquences.

Tableau 3-2 Variables explicatives et variables dépendantes

Categorie	Variable	Description
Système d'avertissement	Panneaux indicateurs, feux clignotants, barrières	
Caractéristiques liées à la route	Vitesse permise sur la route	km/h
	Largeur de la chaussée	pi
	Type de revêtement	
	Catégorie de route	
Caractéristiques liées au chemin de fer	Nombre de voies ferrées	Nombre
	Limite de vitesse des trains	mi/h
	Angle d'intersection	Degré
Débit de circulation	Nombre de véhicules par jour	Nombre moyen annuel
	Nombre de trains par jour	
Collisions observées	Nombre de collisions	
	Nombre de morts	
	Nombre de blessés graves	

3.4 Description des collisions

Pour les 10 797 observations utilisables (relatives à 10 381 passages à niveau) dans les données, 1 724 collisions au total ont été signalées au cours des neuf ans allant de 1993 à 2001, au Canada. Ces collisions ont fait 242 tués et 347 blessés graves. Les tableaux 3-3a et 3-3b donnent la répartition des passages à niveau et des collisions par type de système d'avertissement et de conséquences. Les systèmes d'avertissement indiqués dans ces tableaux sont ceux qui équipaient les passages à niveau l'année où les collisions ont été enregistrées dans la BDEF. Cette information a été tirée du plan de travail de Transports Canada concernant l'amélioration des systèmes d'avertissement, pour la période de 1993 à 2001.

Les dommages matériels signalés avaient trait à 12 catégories de biens et à quatre catégories de dommages. Les catégories de biens sont les suivantes : bâtiments ferroviaires, bâtiments privés, véhicules privés, locomotives, voitures à voyageurs, wagons de marchandises, camions, tunnels, ponceaux, ponts, hangars, voies. Les catégories de dommages sont : destruction, dommage majeur, dommage mineur et aucun dommage.

Tableau 3-3a Répertoire des passages à niveau selon le système d'avertissement (2001)

Type de système d'avertissement	Nombre de passages à niveau
Panneaux indicateurs	5 184
Panneaux indicateurs et feux clignotants	3 695
Panneaux indicateurs, feux clignotants et barrières	1 502
Total	**10 381**

Tableau 3-3b Fréquence des collisions et conséquences (1993-2001)

Type de système d'avertissement (au moment de la collision)	Nombre de collisions	Nombre de morts	Nombre de blessés graves
Panneaux indicateurs	698	109	143
Panneaux indicateurs et feux clignotants	733	86	154
Panneaux indicateurs, feux clignotants et barrières	293	47	50
Total	**1 724**	**242**	**347**

3.5 Description statistique

Les tableaux 3-4 et 3-5 présentent un sommaire des données statistiques relatives aux différentes variables. Ces statistiques, tirées de la base de données BDEF/SIIF, ont servi à l'élaboration des modèles de prévision de la fréquence des collisions et de leurs conséquences. La répartition de l'échantillon selon chaque variable est donnée à l'annexe A. L'exposition à la circulation, dans le cas des passages à niveau, est définie comme le produit croisé obtenu en multipliant le DJMA par le nombre de trains par jour. Il convient de noter que dans ces tableaux, le nombre maximal de collisions par passage à niveau, d'après la base de données, est de sept, et le nombre maximal de tués et de blessés graves s'élève à deux et à trois, respectivement, pour la période de 1993 à 2001. Une variation importante est observée aux chapitres de la limite de vitesse des trains, de la vitesse permise sur la route (en km/h), du nombre de voies et de l'angle d'intersection. On remarque en outre une variation importante de l'exposition, d'un passage à niveau à l'autre.

Une analyse de corrélation indépendante révèle l'absence de corrélation entre la plupart des variables, si ce n'est la vitesse permise sur la route et la catégorie de la route. Les variables prises comme facteurs dans les modèles de régression affichaient des fluctuations considérables.

Tableau 3-4 Description statistique des variables prédictives utilisées dans le modèle de prévision de la fréquence des collisions

Variable	Unité	Moyenne	Écart-type échantillon	Minimum	Maximum
Angle_inter.	Degré	70,26	19,17	3	90
Nombre_voies	Nombre	1,23	0,58	1	9
Vitesse_trains	mi/h	41,00	20,72	4	100
Vitesse_route	km/h	59,39	21,16	5	110
Largeur_surf_ croisement	pi	10,62	5,42	2	99
Catégorie_route	1, route de dégagement; 0, autres				
Route_revêt.	1, revêtue; 0, non revêtue				
Type_avert.	1, passif (panneaux); 0, automatisé				
DJMA	Véhicules/ jour	1 602,32	4 054,34	1	57 000
Nombre de trains par jour	Trains/jour	9,50	13,06	1	338
Nombre de collisions	En neuf ans	0,177	0,52	0	7

Tableau 3-5 Description statistique des variables prédictives utilisées dans le modèle de prévision des conséquences des collisions

Variable	Unité	Moyenne	Écart-type échantillon	Minimum	Maximum
Angle_inter.	Degré	71,64	18,18	11	90
Nombre_voies	Nombre	1,36	0,72	1	6
Vitesse_trains	mi/h	44,41	21,80	5	95
Vitesse_route	km/h	57,80	19,63	10	100
Largeur_surf croisement	pi	12,58	5,95	3	53
Catégorie_route	1, route de dégagement; 0, autres				
Route_revêt.	1, revêtue; 0, non revêtue				
Type_avert.	1, passif (panneaux); 0, automatisé				
DJMA	Véhicules/ jour	3 689,03	6 287,01	1	57 000
Nombre de trains par jour	Trains/jour	13,46	13,04	1	122
Nombre de collisions	Nombre	1,03	0,19	1	3
Nombre de morts	Nombre	0,13	0,36	0	2
Nombre de blessés graves	Nombre	0,20	0,48	0	3

4 PRÉVISION DE LA FRÉQUENCE DES COLLISIONS

Le présent chapitre traite de l'élaboration des modèles de prévision des collisions applicables aux passages à niveau du Canada. Des modèles distincts ont été élaborés pour chaque type de système d'avertissement : panneaux indicateurs seulement (S), feux clignotants (F) et barrières (G). Diverses hypothèses concernant la distribution des collisions observées ont été étudiées. Selon une analyse de validation faite à l'aide d'un ensemble de données autre que celui qui a servi au calage, c'est le modèle de prévision fondé sur la loi de Poisson qui s'est avéré le plus performant. Ce modèle a été utilisé pour étudier la sensibilité des collisions à divers facteurs, dont le type de passage à niveau, la vitesse permise sur la route, le DJMA, la largeur de la surface de croisement, la limite de vitesse des trains, le nombre de voies, le nombre de trains par jour et le système d'avertissement.

Le chapitre se divise en trois parties. Tout d'abord, l'applicabilité aux données canadiennes du modèle de prévision des collisions US DOT est examinée. Puis, un ensemble de modèles de prévision des collisions sont élaborés et validés pour les données canadiennes. Enfin, la sensibilité des modèles canadiens est étudiée relativement à certaines caractéristiques des passages à niveau.

4.1 Applicabilité du modèle de prévision des collisions US DOT aux données canadiennes

La première tâche a consisté à vérifier l'applicabilité du modèle US DOT à la prévision des collisions aux passages à niveau canadiens contenues dans la base de données BDEF/SIIF. Or, la description d'un certain nombre des passages à niveau figurant dans la base de données s'est révélée mal adaptée à nos besoins (certaines variables du modèle US DOT étaient passées sous silence). Ces passages à niveau ont donc été retirés de la base de données aux fins de toute analyse ultérieure.

Les différences entre les collisions prévues et les collisions observées ont été soumises à un test de validité de l'ajustement chi carré. Ce test consiste à comparer le nombre observé et le nombre estimatif (selon le modèle) de collisions, pour différentes combinaisons de caractéristiques des passages à niveau. Pour ce test, les passages à niveau contenus dans la base de données ont été classés selon trois types de systèmes d'avertissement, trois niveaux de limite de vitesse des trains et deux niveaux d'exposition à la circulation. Une faible valeur de chi carré (qui dénote une différence non statistiquement significative) laisse conclure à une adéquation satisfaisante entre les résultats prévus et les résultats observés pour les caractéristiques prises en compte.

Pour la classification ci-dessus, le modèle US DOT s'est avéré surestimer le nombre de collisions à tous les passages à niveau, peu importe le type de système d'avertissement (valeur du chi carré supérieure à la valeur critique, à un

seuil de signification de 5 p. 100). Dans l'ensemble, le modèle a prévu 349 collisions de plus que le nombre observé dans la base de données BDEF/SIIF pour la période de 1993 à 2001. Sur la base de ces résultats agrégés, nous avons conclu que le modèle US DOT ne pouvait s'appliquer aux données canadiennes, et qu'il fallait élaborer un modèle distinct. Cette inapplicabilité est difficile à expliquer à première vue. Il se peut que le résultat soit influencé par certains rajustements subjectifs incorporés au modèle US DOT, qui reflètent des conditions propres aux États-Unis.

4.2 Résultats des modèles de prévision des collisions

Deux types de modèles de prévision des collisions fondés sur la loi de Poisson ont été élaborés. Dans le modèle I, le «type de système d'avertissement» constitue une variable explicative distincte dans une équation de prévision unique. Le modèle II traite les dispositifs d'avertissement séparément. Ainsi, il comprend trois équations spécifiques, une pour chaque type de dispositif d'avertissement (panneaux indicateurs, feux clignotants et barrières). Ce modèle s'inspire fortement de l'approche du modèle US DOT.

Pour constituer l'ensemble des données relatives aux 10 797 passages à niveau aux fins du calage et de la validation du modèle, tous les passages à niveau privés et de ferme et les sauts-de-mouton ont été retirés de la base de données BDEF/SIIF. D'autres passages à niveau pour lesquels les données étaient incomplètes ont aussi été éliminés.

4.2.1 Fractionnement des données

Avant qu'un nouveau modèle de prévision des collisions pour les passages à niveau canadiens soit élaboré, les données BDEF/SIIF ont été divisées en deux échantillons aléatoires dans un rapport de 75:25 p. 100 : un échantillon de 8 098 observations pour le calage du modèle et un autre de 2 699 passages à niveau pour sa validation (figure 4.1).

Au total, 1 724 collisions ont été enregistrées dans la base de données BDEF/SIIF exploitable, de 1993 à 2001, pour toutes les régions du Canada. La ventilation des passages à niveau où des collisions ont été observées est présentée au tableau 4-1. Plus de 86 p. 100 des passages à niveau n'ont enregistré aucune collision au cours des neuf années étudiées. Et aux passages à niveau où sont survenues des collisions, dans la majorité des cas, il s'agissait d'une ou deux collisions sur neuf ans. Donc, les cas de «collision nulle» dominent les données. Cela pose certains problèmes pour ce qui est d'utiliser les modèles de Poisson pour prévoir les collisions aux passages à niveau.

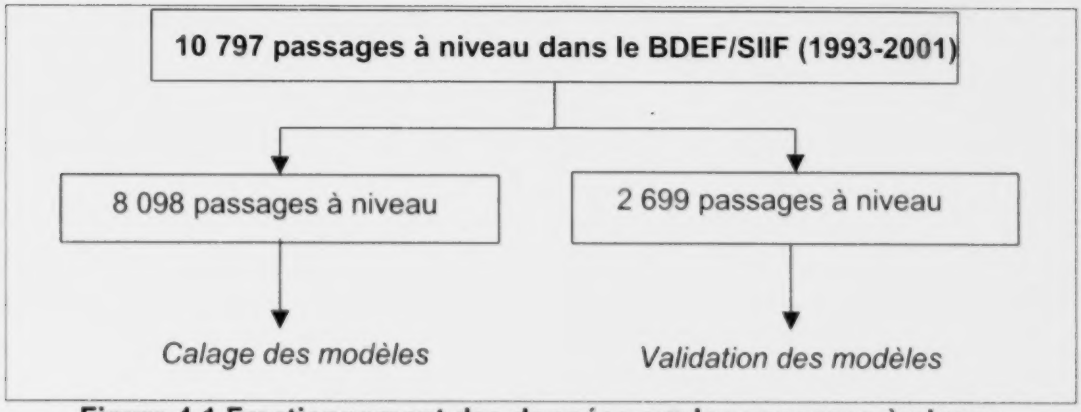


Figure 4.1 Fractionnement des données sur les passages à niveau aux fins du calage et de la validation des modèles

Tableau 4-1 Passages à niveau et collisions observés par type de système d'avertissement

Type d'avert.	Ensemble de données total	Données utilisées pour le calage du modèle		Données utilisées pour la validation du modèle	
		Nombre de passages	Nombre de collisions	Nombre de passages	Nombre de collisions
Type S	5 329	3 983	496	1 346	202
Type F	3 966	2 982	560	984	173
Type G	1 502	1 133	214	369	79
Total	**10 797**	**8 098**	**1 270**	**2 699**	**454**

4.2.2 Résultats des modèles de prévision des collisions

Modèle I (Poisson)

Pour le modèle I, le type de système d'avertissement a servi de variable nominale : 1 pour les passages à niveau avec panneaux indicateurs et 0 pour les passages à niveau avec feux clignotants et/ou barrières. La variable «système d'avertissement» s'est avérée statistiquement significative à un seuil de 5 p. 100. D'autres variables ont été étudiées, soit la catégorie de la route (route de dégagement et autres catégories), l'état de la chaussée (revêtue ou non), l'angle d'intersection, le nombre de voies ferrées, la limite de vitesse des trains et des véhicules routiers, la largeur de la chaussée et l'exposition à la circulation. Quatre des huit facteurs se sont avérés statistiquement significatifs au même seuil de 5 p. 100.

Le nombre annuel prévu de collisions à chaque passage à niveau [E(m)] est exprimé comme suit :

$$E(m) = e^{[-6,3142 + 0,9798 * WD \ \ 0,1057 * TN + 0,0051 * TSPD + 0,3933 * \ln (EXPO)]} \quad \textbf{(4.1)}$$

Où : WD = variable nominale correspondant au type de système d'avertissement (1 pour panneaux indicateurs, et 0 pour feux clignotants ou barrières)

TN = nombre de voies ferrées (dans les deux sens)

TSPD = limite de vitesse des trains (mi/h)

EXPO = produit croisé obtenu en multipliant le DJMA par le nombre de trains par jour

Il convient de noter que toutes les variables de l'équation 4.1 font aussi partie du modèle US DOT. Mais, contrairement au modèle US DOT, l'équation ci-dessus ne comprend pas les variables «nombre de voies (route)», «nombre de trains directs» ni «état de la chaussée».

L'équation ci-dessus a produit une somme des carrés des écarts (ou statistique G^2) de 0,61, et une valeur X^2 de Pearson de 1,098. Selon Wood (2002) et Maher et Summergill (1996), la statistique X^2 doit servir d'indice de l'adéquation du modèle lorsque la moyenne est faible (comme lorsque les valeurs sont inférieures à 0,5). Pour le présent modèle, il est à noter que la somme des carrés des écarts (G^2) est de beaucoup inférieure à 1,0. Par contre, la valeur X^2 de Pearson est très près de 1,0, ce qui permet de conclure que les données obéissent à la loi de Poisson. Le problème de surdispersion n'est pas préoccupant.

Au niveau global, le modèle I a donné de piètres résultats au test chi carré de validité de l'ajustement. En effet, l'exposition à la circulation s'inscrivait dans des intervalles différents selon le type de système d'avertissement. Ainsi, les passages à niveau équipés de barrières présentaient des niveaux d'exposition plus élevés que les autres types de passages à niveau. Donc, le modèle donnerait des résultats erronés pour les passages à niveau équipés de barrières où le niveau d'exposition est faible, car il existe peu d'observations aux faibles niveaux d'exposition pour ce type de système d'avertissement. De même, pour les passages à niveau avec panneaux indicateurs, il existe peu d'observations aux niveaux d'exposition élevés. Le modèle II surmonte cette difficulté en établissant des équations distinctes pour chacun des trois types de systèmes d'avertissement. Dans le modèle II, l'exposition est limitée par l'intervalle pour lequel il existe des observations.

Modèle II (Poisson)

Pour le modèle II, trois équations de régression distinctes ont été établies, une pour chacun des trois types de systèmes d'avertissement (types S, F et G, définis ci-dessus). Les résultats sont exposés ci-après.

Passages à niveau de type S

Le modèle de Poisson pour les passages à niveau munis uniquement de panneaux indicateurs est le suivant :

$$E(m_S) = e^{[-5,66 + 0,0128 * TSPD + 0,3791 * \ln (EXPO)]} \quad \textbf{(4.2)}$$

Où : *TSPD* = limite de vitesse des trains (mi/h)
EXPO = produit croisé obtenu en multipliant le DJMA par le nombre de trains par jour

Dans ce modèle, la vitesse du train et l'exposition à la circulation se sont avérés statistiquement significatifs. Malgré cela, le modèle a produit un X^2 proche de 1,0 (1,03) au test de Pearson, ce qui indique une légère surdispersion des données.

Le modèle II de Poisson a aussi été utilisé pour prévoir les collisions aux passages à niveau classés selon la limite de vitesse des trains et l'exposition à la circulation. Un test chi carré de validité de l'ajustement a été appliqué aux résultats. Le chi carré calculé (12,87) se rapproche de la valeur critique ($\chi^2_{0,05,5} = 11,07$), au seuil de 5 p. 100. Hormis le problème de surdispersion des données, les résultats s'avèrent raisonnables et statistiquement justes dans le cas des passages à niveau avec panneaux indicateurs.

Passages à niveau de type F

Dans le cas des passages à niveau équipés de panneaux indicateurs et de feux clignotants, le modèle est de la forme :

$$E(m_F) = e^{[-9,1620 + 0,0112 * TSPD + 0,0151 * SW + 0,6103 * \ln (EXPO)]} \quad \textbf{(4.3)}$$

Où : *TSPD* = limite de vitesse des trains (mi/h)
SW = largeur de la surface de croisement (pi)
EXPO = produit croisé obtenu en multipliant le DJMA par le nombre de trains par jour

Cette équation contient trois variables explicatives statistiquement significatives. Encore une fois, ces variables concordent avec celles du modèle US DOT pour ce type de système d'avertissement. Un X^2 de 1,15 au test de Pearson indique une légère surdispersion des données.

La valeur obtenue au test chi carré de validité de l'ajustement (14,87), qui comparait les collisions observées et prévues pour différentes limites de vitesse

des trains et valeurs d'exposition à la circulation, est légèrement supérieure à la valeur critique ($\chi^2_{0,05,5}$=11,07), à un seuil de 5 p. 100.

Passages à niveau de type G

Une troisième équation de prévision des collisions a été établie pour les passages à niveau équipés de panneaux indicateurs, feux clignotants et barrières. L'équation est de la forme :

$$E(m_G) = e^{[-7,2304 + 0,0118 * RSPD + 0,1912 * TN + 0,3526 * \ln(EXPO)]} \quad \textbf{(4.4)}$$

Où : *RSPD* = vitesse permise sur la route (km/h)
TN = nombre de voies ferrées (dans les deux sens)
EXPO = produit croisé obtenu en multipliant le DJMA par le nombre de trains par jour

Trois variables explicatives se sont avérées statistiquement significatives dans cette équation. Il s'agit des mêmes que l'on retrouve dans le modèle US DOT initial pour ce type de passage à niveau. Une variable a été ajoutée à celles du modèle US DOT, soit le nombre de voies tracées sur la chaussée. Dans la présente analyse, la variable «nombre de voies tracées sur la chaussée», ou «largeur de la surface de croisement», n'était pas significative, à un seuil de 5 p. 100. Un X^2 de 1,15 au test de Pearson laisse conclure à une légère surdispersion des données.

Le test chi carré de validité de l'ajustement a donné de bons résultats, lorsque les passages à niveau étaient classés selon la limite de vitesse des trains et l'exposition à la circulation. En effet, la valeur du chi carré (6,12) était inférieure à la valeur critique, à un seuil de 5 p. 100. Cela indique un bon ajustement du modèle aux données observées.

4.3 Ajustement bayésien empirique des résultats du modèle de Poisson

Selon certains chercheurs, le modèle bayésien empirique (BE) offre une solution intéressante aux problèmes du surdispersion des données. Si nous traitons ici du modèle de prévision BE, c'est uniquement dans le but de le comparer au modèle de Poisson.

Comme le montre l'équation 4.5, le modèle BE donne une estimation des collisions prévues aux passages à niveau (ε), d'après les données statistiques (modèle de Poisson) et empiriques. L'inclusion des données empiriques permet de tenir compte des événements «nuls» (zéro collision) dans les données observées. La prévision qui s'ensuit devrait donc être meilleure que celle du seul modèle de Poisson.

L'équation est de la forme :

$$\varepsilon = \alpha * E(m) + (1-\alpha) * X \qquad \textbf{(4.5)}$$

Où : $E(m)$ = nombre de collisions prévues par le modèle de Poisson, selon les équations 4.1 à 4.4

X = nombre de collisions observées par passage à niveau

Cette équation comprend un facteur (α), qui représente un lien pondéré entre le nombre de collisions observées et le nombre de collisions prévues selon le modèle de Poisson, à chaque passage à niveau. L'équation pour ce facteur est de la forme :

$$\alpha = \frac{E(m)}{E(m) + K * E(m)^2} \qquad \textbf{(4.6)}$$

Comme la méthode BE exige des données empiriques, les données BDEF/SIIF ont été classées dans deux échantillons, selon un critère temporel. Le premier échantillon comprend les collisions déclarées au cours des quatre premières années (1993 à 1996) de la période étudiée. Il a été utilisé pour le calcul de ε dans l'équation BE. Le deuxième échantillon (1997 à 2000) a été utilisé pour valider le modèle.

Dans l'approche BE, le facteur K indique dans quelle mesure les données sont sous-dispersées ou surdispersées. Ce facteur est calculé au moyen de méthodes empiriques itératives, dans lesquelles la somme des carrés résiduelle (observations-prévisions) pour tous les passages à niveau compris dans l'ensemble des données ayant servi au calage du modèle est réduite au minimum. Pour une description détaillée de cette procédure, le lecteur se reportera au rapport de Hutchinson et Mayne (1977).

Trois facteurs K distincts ont été calculés, soit un pour chaque type de système d'avertissement, comme suit :

Type de système d'avertissement	**Facteur K**
Type S	0,001
Type F	0,200
Type G	3,080

Les résultats du modèle BE ont ensuite été agrégés selon le type de système d'avertissement, la limite de vitesse des trains et l'exposition à la circulation, puis comparés au collisions observées. Comme on peut le voir à la figure 4.2, le modèle BE ne représente pas une grande amélioration par rapport au modèle de Poisson. Les estimations du modèle BE dépendent des observations empiriques. En l'occurrence, davantage de collisions ont été observées pendant les quatre

premières années que pendant les quatre dernières. Le modèle BE pose donc une exigence impérieuse, soit de disposer d'observations étalées sur suffisamment d'années pour obtenir une représentation réaliste du risque empirique de collision à chaque passage à niveau. Étant donné la faible fréquence des collisions aux passages à niveau, une période de quatre ans n'est peut-être pas suffisante. **Nous avons donc retenu le modèle de Poisson pour prévoir les collisions aux passages à niveau au Canada pour les trois types de systèmes d'avertissement.**

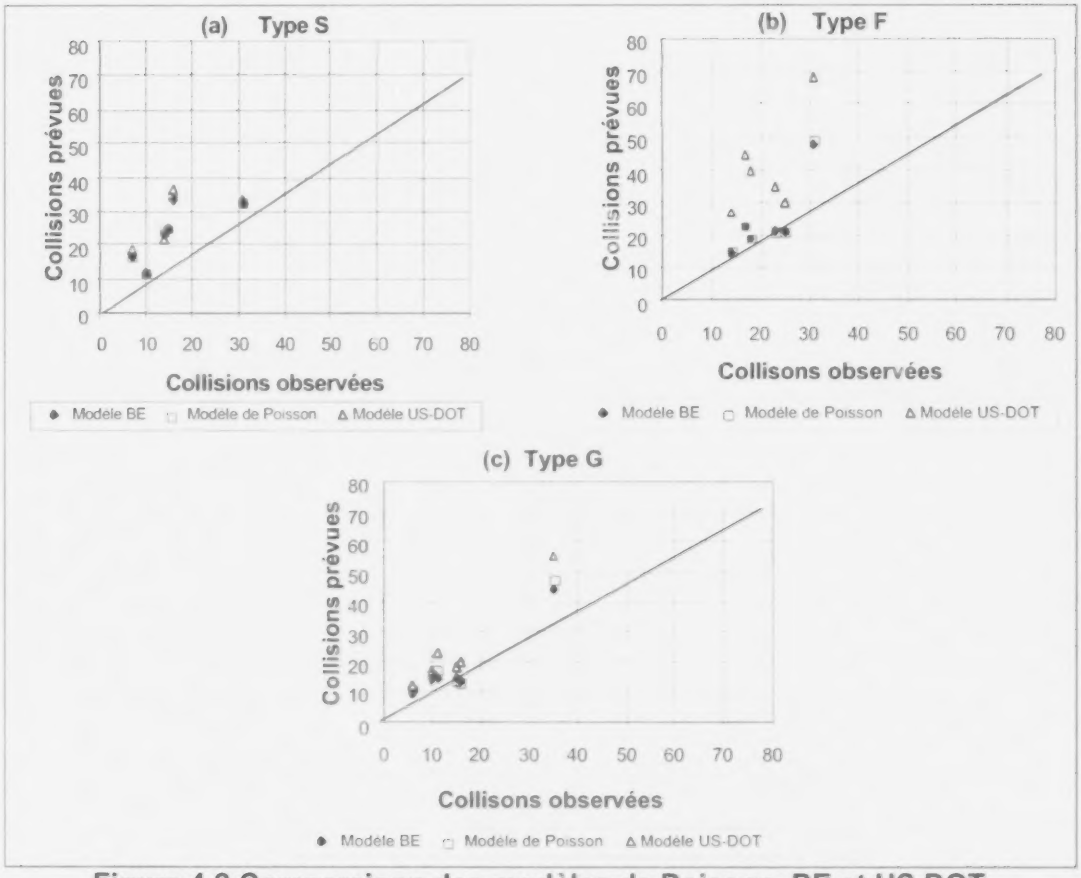


Figure 4.2 Comparaison des modèles de Poisson, BE et US DOT

4.4 Analyse de sensibilité (modèle de Poisson)

Cette section rend compte de l'analyse de sensibilité effectuée pour déterminer les facteurs de risque qui ont un effet significatif sur le nombre de collisions aux passages à niveau. Cette analyse peut aider à définir des stratégies efficaces et économiques pour réduire le nombre de collisions.

4.4.1 Effet du système d'avertissement

Les figures 4.3 (1) et 4.3 (2) illustrent le ratio des collisions prévues, pour les trois types de systèmes d'avertissement, selon le DJMA et la vitesse limite des trains. Cette analyse suscite trois commentaires.

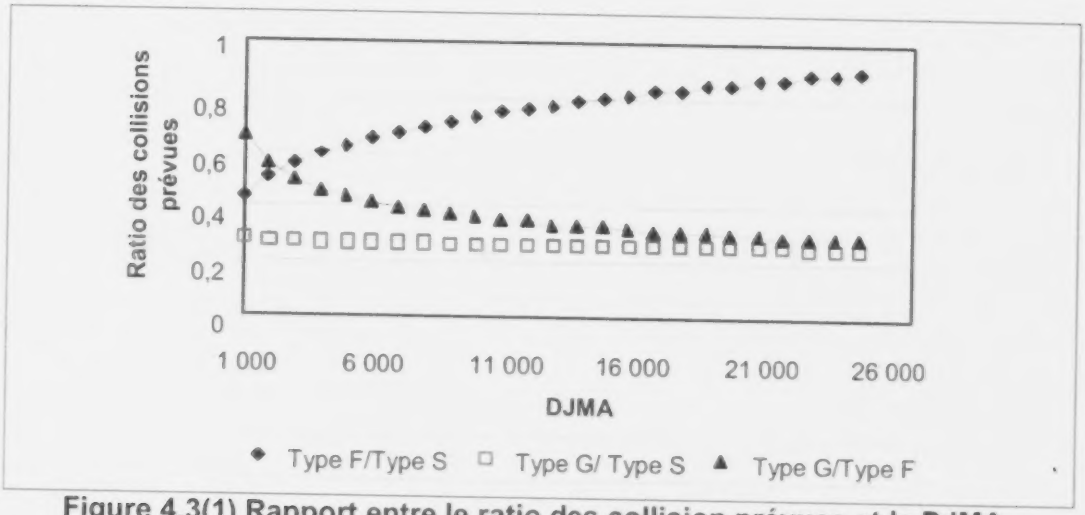


Figure 4.3(1) Rapport entre le ratio des collision prévues et le DJMA, pour trois types de systèmes d'avertissement (lorsque la vitesse limite des trains = 30 mi/h, la vitesse permise sur la route = 50 km/h, le nombre de voies ferrées = 2, la largeur de la chaussée = 12 pi et le nombre de trains par jour = 6)

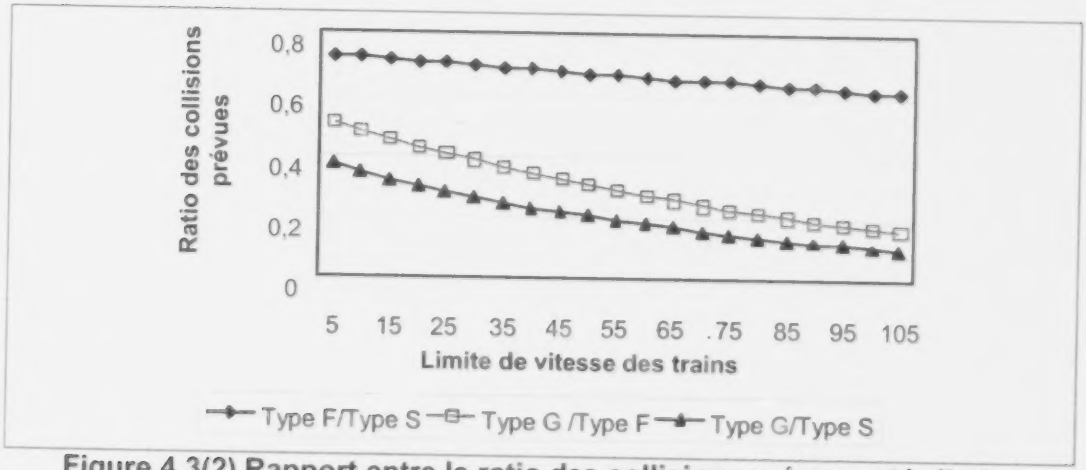


Figure 4.3(2) Rapport entre le ratio des collisions prévues et la limite de vitesse des trains, pour trois types de systèmes d'avertissement (lorsque le DJMA = 8 000 véhicules/jour, la vitesse permise sur la route = 50 km/h, le nombre de voies ferrées = 2, la largeur de la chaussée = 12 pi et le nombre de trains par jour = 6)

Premièrement : les ratios pour les feux clignotants (type F) et les barrières (type G) par rapport aux panneaux indicateurs (type S) sont toujours inférieurs à 1,0, pour tous les niveaux de DJMA et de limite de vitesse des trains. Cela laisse penser que si le système d'avertissement était amélioré (si on installait des feux clignotants ou des barrières plutôt que de simples panneaux indicateurs), on pourrait faire diminuer quelque peu le nombre de collisions. Une mise en garde s'impose ici. Le peu de passages à niveau munis de feux clignotants et de barrières aux faibles niveaux d'exposition (DJMA) pourrait avoir influé sur les résultats.

Deuxièmement : l'avantage à attendre de l'amélioration du système d'avertissement (évolution du type S au type F) semble insensible à la limite de vitesse des trains, mais dépendant du DJMA. Comme prévu, à mesure qu'augmente le DJMA, l'avantage associé à la mise en place de feux clignotants décroît en même temps que s'accentue l'avantage associé à l'installation de barrières.

Troisièmement : selon le modèle, il est toujours avantageux d'installer des feux clignotants ou des barrières aux passages à niveau qui ne sont munis que de panneaux indicateurs. Ce résultat dépend toutefois du niveau d'exposition associé au passage à niveau, pour les différents types de systèmes d'avertissement. La diminution du nombre de collisions résultant de l'amélioration du système d'avertissement semble être d'autant plus importante que la limite de vitesse des trains est élevée.

4.4.2 Effet des caractéristiques liées à la route

Les principaux facteurs de risque liés à la route auxquels peuvent être imputées les collisions aux passages à niveau sont : le débit de circulation routière ou le DJMA (inclus dans la variable *exposition*), la vitesse permise sur la route et la largeur de la surface de croisement. Les figures 4.4(1) et 4.4(2) illustrent le nombre annuel de collisions prévues en fonction du DJMA et de la vitesse permise sur la route, pour les trois types de systèmes d'avertissement.

Comme prévu, le débit de circulation a un effet négatif sur la sécurité aux passages à niveau, peu importe le type de système d'avertissement. Aussi, le nombre prévu de collisions augmente en raison directe du débit de circulation. Le taux d'augmentation dépend du type de système d'avertissement. Les panneaux indicateurs et les feux clignotants sont associés à la plus forte augmentation, et les barrières, à la plus faible. Cela signifie que le débit de circulation a plus d'effet sur le nombre de collisions lorsque le passage à niveau est muni de panneaux indicateurs et de feux fixes que lorsqu'il est muni de feux clignotants et de barrières. Il est à noter que plus le DJMA est élevé, plus le nombre prévu de collisions aux passages à niveau équipés de feux clignotants augmente, jusqu'à une valeur quasi égale à celle calculée pour les passages à niveau équipés de panneaux indicateurs. Cela signifie qu'aux niveaux élevés de DJMA, l'efficacité des feux clignotants diminue.

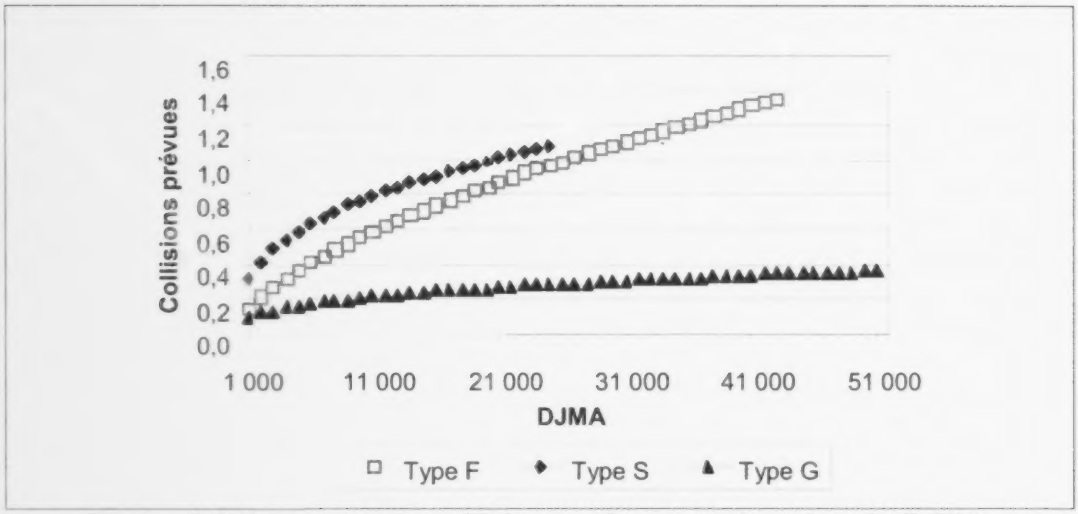


Figure 4.4(1) Nombre de collisions prévues en fonction du DJMA, pour trois types de systèmes d'avertissement (lorsque la limite de vitesse des trains = 30 mi/h, la vitesse permise sur la route = 50 km/h, le nombre de voies ferrées = 2, la largeur de la chaussée = 12 pi et le nombre de trains par jour = 6)

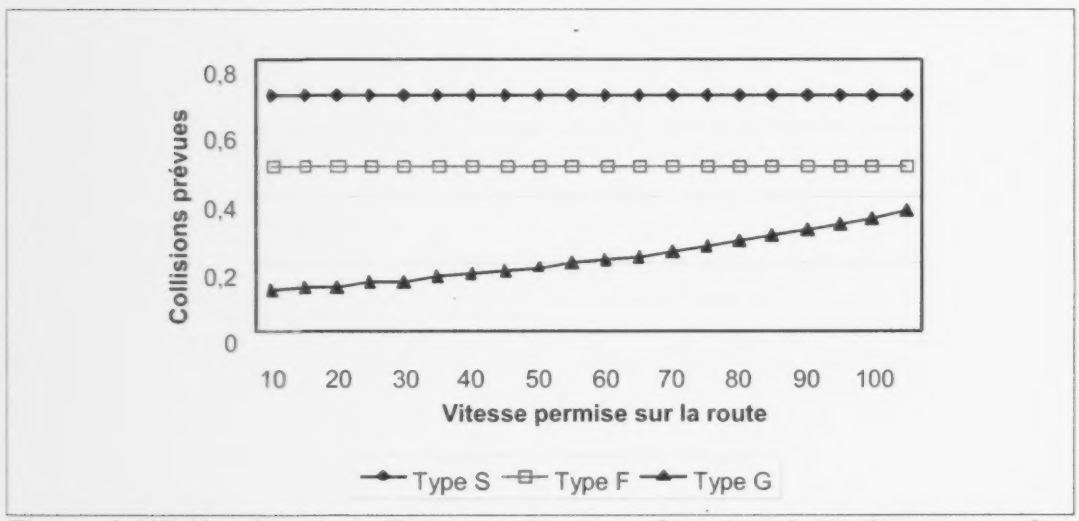


Figure 4.4(2) Nombre de collisions prévues en fonction de la vitesse permise sur la route, pour trois types de systèmes d'avertissement (lorsque le DJMA = 8 000 véhicules/jour, la vitesse limite des trains = 30 mi/h, le nombre de voies ferrées = 2, la largeur de la chaussée = 12 pi et le nombre de trains par jour = 6)

La vitesse permise sur la route a un effet significatif sur le nombre de collisions aux passages à niveau équipés de barrières, mais cet effet est négligeable dans le cas des passages à niveau équipés de panneaux indicateurs et de feux clignotants. Pour les passages à niveau munis de barrières, l'augmentation de la

vitesse permise sur la route se traduit par une augmentation du nombre de collisions prévues. Ce résultat diffère de celui obtenu avec le modèle US DOT, qui ne tenait pas compte de la vitesse permise sur la route, quel que soit le type de système d'avertissement.

D'autres facteurs, comme la «largeur de la surface de croisement», se sont avérés avoir un effet significatif sur le nombre de collisions aux passages à niveau équipés de feux clignotants. Mais leur contribution globale au nombre de collisions prévues n'était pas aussi importante que l'effet produit par l'exposition à la circulation et la vitesse permise sur la route, respectivement.

4.4.3 Effet des caractéristiques liées au chemin de fer

Les caractéristiques liées au chemin de fer qui ont un effet sur le nombre prévu de collisions aux passages à niveau sont : le nombre de trains par jour, la limite de vitesse des trains et le nombre de voies ferrées. Les figures 4.5(1) et 4.5(2) illustrent ces relations pour les trois types de systèmes d'avertissement. Le nombre de voies ferrées n'a pas d'effet sur les collisions aux passages à niveau équipés de panneaux indicateurs et de feux clignotants, mais a un effet positif sur celles-ci, aux passages à niveau munis de barrières.

La limite de vitesse des trains a un effet positif (défavorable) sur les collisions aux passages à niveau munis de panneaux indicateurs et de feux clignotants. La hausse de la limite de vitesse des trains entraîne une augmentation exponentielle du nombre de collisions à ces deux types de passages à niveau. Mais aux passages à niveau équipés de barrières, la limite de vitesse des trains n'influe aucunement sur le nombre de collisions. À limite de vitesse des trains égale, c'est aux passages à niveau munis de panneaux indicateurs qu'il semble survenir le plus de collisions, suivis des passages à niveau avec feux clignotants et, enfin, de ceux qui sont équipés de barrières.

Par ailleurs, l'augmentation du nombre de trains par jour entraîne une augmentation du nombre de collisions prévues. À un faible débit de circulations ferroviaires, il semble se produire davantage de collisions aux passages à niveau munis de panneaux indicateurs qu'à ceux équipés de feux clignotants et de barrières. À un fort débit de circulations ferroviaires, le nombre prévu de collisions aux passages à niveau avec feux clignotants se rapproche du nombre prévu aux passages à niveau avec panneaux indicateurs.

À de faibles valeurs du nombre de trains par jour, les passages à niveau munis de panneaux indicateurs sont ceux où surviennent le plus de collisions, suivis de ceux qui sont équipés de feux clignotants. À ces faibles débits, les passages à niveau équipés de barrières enregistrent moins de collisions que les deux autres types de passages à niveau. Donc, selon les modèles, lorsque le nombre de trains par jour est faible, il serait avantageux d'ajouter aux panneaux indicateurs des feux clignotants ou des barrières, mais lorsque le nombre de trains est élevé,

passer des panneaux indicateurs aux feux clignotants serait peu rentable sur le plan de la sécurité. À ce niveau, il est recommandé d'installer des barrières.

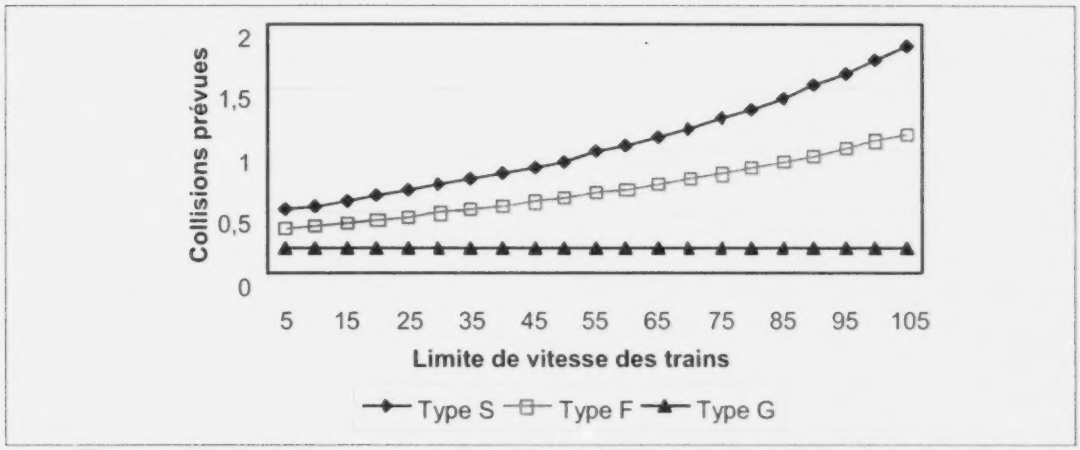


Figure 4.5(1) Nombre de collisions prévues en fonction de la limite de vitesse des trains, pour trois types de systèmes d'avertissement (lorsque le DJMA = 8 000 véhicules/jour, la vitesse permise sur la route = 50 km/h, le nombre de voies ferrées = 2, la largeur de la chaussée = 12 pi et le nombre de trains par jour = 6)

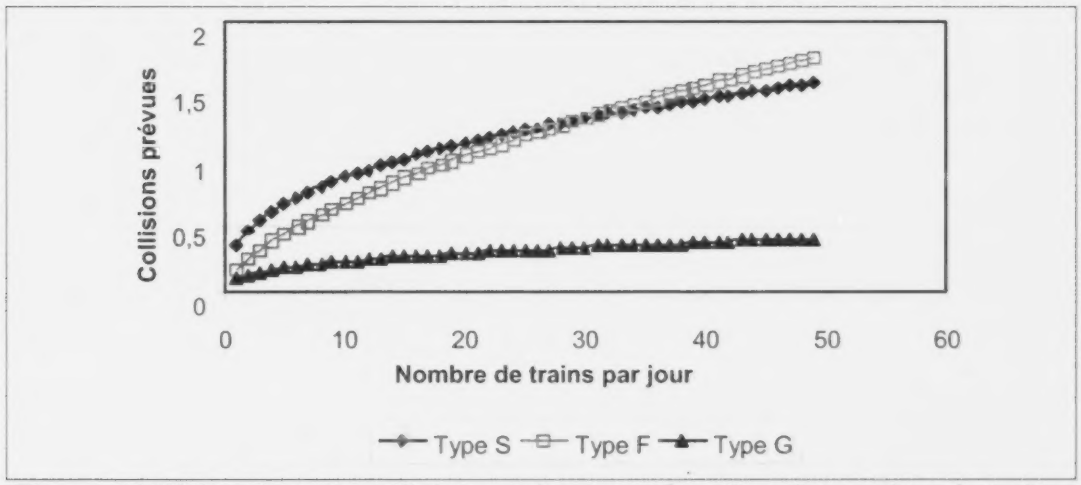


Figure 4.5(2) Nombre de collisions prévues en fonction du nombre de trains par jour, pour trois types de systèmes d'avertissement (lorsque le DJMA = 8 000 véhicules/jour, la vitesse limite des trains = 30 mi/h, la vitesse permise sur la route = 50 km/h, le nombre de voies ferrées = 2 et la largeur de la chaussée = 12 pi)

4.4.4 La prévision de la fréquence des collisions – Résumé

Un programme systématique d'amélioration de la sécurité aux passages à niveau dépend de modèles et d'outils qui peuvent servir à déterminer les «points noirs», autrement dit, les passages à niveau où le risque de collision est inacceptable et où les interventions en sécurité sont le plus justifiées. Ont été abordés dans la présente section un ensemble de modèles de prévision des collisions élaborés expressément en fonction des données canadiennes de fréquence et d'exposition. Après évaluation, le modèle US DOT a été jugé non applicable aux données canadiennes. Des modèles distincts, dits de Poisson et BE (bayésien empirique) ont alors été élaborés et évalués pour trois différents types de systèmes d'avertissement, à partir des données relatives aux passages à niveau pour toutes les régions du Canada. Les résultats des tests chi carré de validité de l'ajustement indiquent que le modèle de Poisson offre le meilleur ajustement aux données observées lorsque les passages à niveau sont regroupés selon leur système d'avertissement, le débit de circulation routière et ferroviaire (exposition à la circulation) et la limite de vitesse des trains. Une analyse de sensibilité réalisée à l'aide des modèles calés a mené aux résultats ci-après.

À conditions égales (DJMA, limite de vitesse des trains, vitesse permise sur la route et nombre de voies ferrées), c'est aux passages à niveau équipés de panneaux indicateurs que se produisent le plus de collisions par année, parmi les trois types de systèmes d'avertissement. Cela donne à penser que l'on peut s'attendre à une diminution du nombre de collisions en équipant les passages à niveau avec panneaux indicateurs (signalisation passive) de feux clignotants et de barrières (dispositifs automatisés).

Bien qu'il soit toujours avantageux d'automatiser un passage à niveau, c.-à-d. de le doter de feux clignotants et de barrières plutôt que de simples panneaux indicateurs, l'effet relatif de ces travaux est tributaire du débit de circulation routière, du nombre de trains par jour, de la limite de vitesse des trains et de la largeur de la surface de croisement.

Le nombre prévu de collisions aux passages à niveau augmente en raison directe des débits de circulation routière et ferroviaire. Le débit de circulation influe davantage sur le nombre prévu de collisions aux passages à niveau dotés de panneaux indicateurs et de feux clignotants qu'à ceux dotés de barrières.

La hausse de la limite de vitesse des trains a un effet défavorable sur le nombre prévu de collisions aux passages à niveau équipés de panneaux indicateurs et de feux clignotants. Dans le cas des passages à niveau avec barrières, l'effet est négligeable.

Il convient de noter que le Canada a enregistré une baisse sensible du nombre de collisions aux passages à niveau ces 20 dernières années. Le modèle ci-dessus indique moins de collisions aux passages à niveau équipés de barrières

qu'à ceux munis de panneaux indicateurs ou de feux clignotants. Peut-être y a-t-il là une explication à la tendance à la baisse du nombre de collisions. En effet, cette baisse pourrait être due à l'ajout de feux clignotants et de barrières à un nombre croissant de passages à niveau. Cette assertion demande toutefois à être examinée à fond, surtout dans un contexte où les seuils de déclaration obligatoire des accidents évoluent.

5 PRÉVISION DES CONSÉQUENCES DES COLLISIONS

La présente section porte sur : 1) l'application du modèle des conséquences US DOT aux données canadiennes, et 2) le calage et la validation du modèle pour les données canadiennes.

5.1 Application du modèle des conséquences US DOT aux données canadiennes

Pour juger de l'applicabilité du modèle des conséquences US DOT aux données canadiennes, celui-ci a été appliqué aux données sur les collisions déclarées. Les estimations obtenues pour chaque passage à niveau ont ensuite été agrégées selon trois types de systèmes d'avertissement, trois limites de vitesse des trains et deux niveaux d'exposition à la circulation. Les conséquences prévues s'écartaient de façon significative des valeurs observées, ce qui donne à penser que le modèle US DOT ne donne pas une représentation juste des données canadiennes, surtout dans le cas des accidents corporels. Un nouveau modèle de prévision des conséquences a donc été élaboré, sur la base des données canadiennes. Trois raisons ont motivé l'élaboration d'un modèle de conséquences distinct pour le Canada : 1) la faible qualité de l'ajustement du modèle US DOT aux données canadiennes; 2) la faible base statistique du modèle US DOT et 3) le traitement inadéquat accordé à la corrélation entre les accidents mortels et les accidents corporels dans le modèle US DOT.

5.2 Modèle canadien de prévision des conséquences des collisions

5.2.1 Établissement d'une cote des conséquences

Selon les données colligées au Canada, les collisions mortelles et les collisions avec blessures représentent un sous-ensemble infime du nombre total des collisions aux passages à niveau. Donc, plutôt que d'élaborer des modèles distincts pour ces deux types de conséquences (morts et blessures), comme le fait le modèle US DOT, nous avons adopté un modèle combiné, qui englobe toutes les conséquences d'une collision donnée. Ces conséquences globales sont exprimées par une «cote de gravité», définie comme la somme pondérée des différents types de conséquences. Il y a plusieurs avantages à cette approche : 1) les collisions mortelles et les collisions avec blessures sont réunies dans une équation unique, qui se révèle particulièrement commode au moment de déterminer les points noirs, 2) elle tire meilleur avantage des données sur les passages à niveau, car tous les passages à niveau où des collisions ont eu lieu sont pris en compte, et pas seulement ceux où les collisions ont entraîné des morts ou des blessures, 3) elle rend compte de la co-linéarité entre collisions mortelles et collisions avec blessures, ce qui exempte de la nécessité de hiérarchiser les modèles, comme dans les équations du modèle US DOT.

Comme les morts, les blessures et les dommages matériels ne contribuent pas tous de la même manière à la gravité des collisions, chacun de ces types de conséquences a été pondéré selon les coûts qui lui sont associés. Ces coûts constituent donc une valeur uniforme, un «étalon», qui permet de comparer les conséquences ou la gravité de différentes collisions (morts, blessures, dommages au véhicule et/ou à des biens). La somme pondérée des conséquences d'une collision donne une «cote de conséquences». Cette cote peut être mise en rapport statistiquement avec diverses caractéristiques du passage à niveau, variables de contrôle et valeurs d'exposition et donner une estimation des conséquences (ou de la gravité) prévues des collisions, à chaque passage à niveau.

Les facteurs de pondération attribués aux morts et aux blessures sont tirés des estimations de coûts de 1995 du National Safety Council (NSC) des États-Unis (Modèle californien d'analyse coûts-avantages du cycle de vie, Département des Transports de la Californie, 1999). Pour ce qui est des dommages matériels, les facteurs de pondération ont été établis à l'aide des chiffres fournis par la Federal Railroad Administration (FRA) des États-Unis, selon une approche fondée sur la volonté de payer.

Voici le coût moyen des différentes conséquences d'une collision, selon les chiffres de la FRA, en $ US de 1995 :

Morts :	2 710 000 $/mort
Blessures :	65 590 $/blessé
Dommages matériels moyens :	61 950 $/collision avec un train

Le facteur de pondération des dommages matériels a été établi à 1,0 et les autres types de conséquences ont été pondérées comme il convient, ce qui a donné une cote de conséquences des collisions (CS_i) de la forme :

$$CS_i = 44 \times NF_i + 1 \times NI_i + 1 \times PD_i \qquad \textbf{(5.1)}$$

NF_i = nombre de morts
NI_i = nombre de blessés
PD_i = dommages matériels

Cette cote donne une idée de la gravité des collisions aux passages à niveau selon le nombre de morts et de blessés, et les dommages matériels.

Les données relatives à la gravité des collisions sont tirées de la base de données du Bureau de la sécurité des transports (BST) du Canada, qui classe les dommages matériels dans 12 catégories, selon le type de bien (y compris le type de véhicule) et quatre niveaux de dommages. Une équivalence a été établie selon les valeurs moyennes publiées pour chaque type de bien. Voici les quatre niveaux de dommages prévus dans la base de données BDEF/SIIF : destruction totale, dommages importants (bien détruit à 80 p. 100), dommages mineurs (bien détruit

à 30 p. 100) et aucun dommage. Ces pourcentages ont été définis par les auteurs au meilleur de leur connaissance.

5.2.2 Fractionnement des données

En raison de données incomplètes, certains passages à niveau de la base de données BDEF/SIIF ont été supprimés pour les fins de l'étude. L'ensemble de données finalement utilisé pour le modèle des conséquences contient 826 collisions, survenues à 720 passages à niveau du Canada, de 1997 à 2001. La variable «conséquences» a été exprimée sous forme de cote, établie en fonction des morts, blessures et dommages matériels déclarés. Les facteurs de risque explicatifs comprenaient la limite de vitesse des trains, la vitesse permise sur la route, le nombre de voies ferrées, l'angle d'intersection, la largeur de la surface de croisement, le DJMA, le nombre de trains par jour et le nombre d'occupants de tous les véhicules routiers en cause dans une collision donnée.

Le fractionnement des données aux fins du calage et de la validation du modèle s'est fait aléatoirement, selon la figure 5.1. Quatre cent treize collisions ont été retenues pour le calage, et 413, pour la validation.

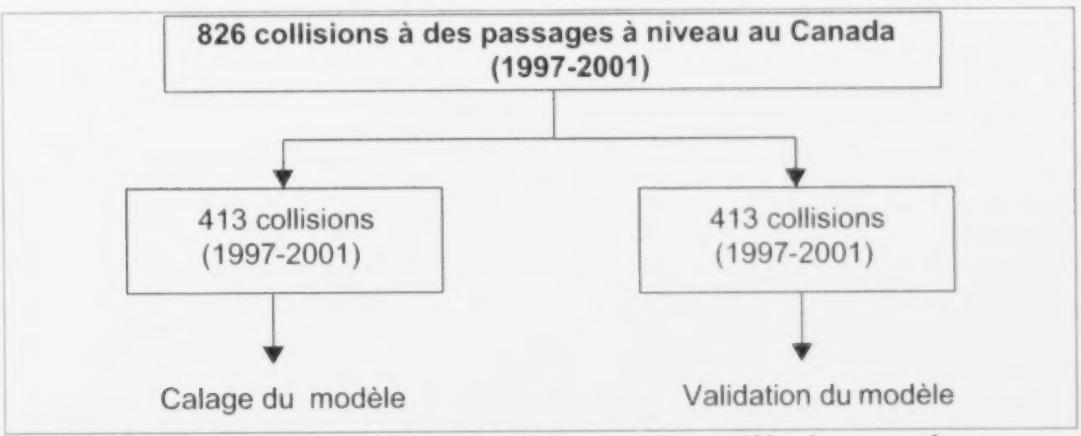


Figure 5.1 Fractionnement des données pour le modèle des conséquences

5.2.3 Calage du modèle canadien de prévision des conséquences d'une collision

Un modèle de Poisson a d'abord été ajusté au moyen de cotes de conséquences. Pour chaque passage à niveau, les cotes de conséquences de toutes les collisions ont été additionnées, et cette somme a été divisée par le nombre de collisions. On a ainsi obtenu une cote de conséquences par collision au passage à niveau, qui joue le rôle de variable dépendante dans le modèle des conséquences. Le nombre total de personnes en cause dans chaque collision a été obtenu en multipliant le nombre des véhicules en cause dans la collision par le nombre d'occupants de tous les véhicules routiers en cause. Cette variable a été traitée comme une variable «offset» indépendante non linéaire dans le modèle des conséquences.

Le modèle des conséquences de Poisson est de la forme :

$$E(C/C) = e^{(-0,4818 + 0,0718 * PI - 0,2433 * TN + 0,0051 * TA + 0,0253 * TSPD)} \quad \textbf{(5.2)}$$

Où : *E(C/C)* = conséquences/collision prévues
PI = nombre de personnes en cause
TN = nombre de voies ferrées (dans les deux sens)
TA = angle d'intersection
TSPD = limite de vitesse des trains (mi/h)

Malgré son effet significatif sur la fréquence des collisions, le type de système d'avertissement s'est révélé n'avoir aucun effet significatif sur la gravité des collisions. Ce résultat concorde avec celui du modèle US DOT.

Les résultats statistiques du modèle de Poisson sont résumés au tableau 5-1.

Tableau 5-1 Résultats du modèle des conséquences de Poisson selon SAS

Critères d'évaluation de la validité de l'ajustement

Critère	DL	Valeur	Valeur/DL
Somme des carrés	408	7229,2396	17,7187
Somme des carrés pondérée	408	7229,2396	17,7187
Chi carré de Pearson	408	15622,974	38,2916
X2 de Pearson pondérée	408	15622,974	38,2916
Log-vraisemblance		3066,6410	

Algorithme convergent.

Analyse des estimations des paramètres

Paramètre	DL	Estimation	Erreur type	Limites de confiance à 95 %	de Wald	Chi-carré	Pr > chi carré
Ord_à l'orig.	1	0,4818	0,0982	0,2894	0,6742	24,10	<0,0001
Pers_en_c.	1	0,0718	0,0108	0,0506	0,0930	44,15	<0,0001
nb_voiesf	1	-0,2433	0,0322	-0,3064	-0,1802	57,12	<0,0001
angle_int.	1	0,0051	0,0011	0,0030	0,0072	21,84	<0,0001
vit_trains	1	0,0252	0,0008	0,0236	0,0269	890,89	<0,0001
Échelle	0	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000		

NOTA : Le paramètre d'échelle est maintenu constant.

Les résultats du tableau 5.1 donnent à penser que tous les paramètres du modèle sont statistiquement significatifs à un seuil de 5 p. 100. Les valeurs de la somme des carrés et du chi carré de Pearson sont supérieures à l'unité, ce qui indique une surdispersion des données par rapport à la distribution de Poisson. Pour surmonter ce problème, nous avons tenté l'ajustement d'un modèle binomial négatif (BN).

Le modèle des conséquences BN résultant est de la forme :

$$E(C_q/C) = e^{(0,3426 * PI - 0,2262 * TN + 0,0069 * TA + 0,0250 * TSPD)} \quad \textbf{(5.3)}$$

Où : $E(C_q/C)$ = conséquences/collision prévues
PI = nombre de personnes en cause

TN = nombre de voies ferrées (dans les deux sens)

TA = angle d'intersection

TSPD = limite de vitesse des trains (mi/h)

Les résultats statistiques du modèle BN sont résumés au tableau 5-2.

Tableau 5-2 Résultats du modèle des conséquences BN selon SAS

Critères d'évaluation de la validité de l'ajustement

Critère	DL	Valeur	Valeur/DL
Somme des carrés	409	441,4557	1,0794
Somme des carrés pondérée	409	441,4557	1,0794
Chi carré de Pearson	409	1157,3388	2,8297
X2 de Pearson pondéré	409	1157,3388	2,8297
Log-vraisemblance		6091,2497	

Algorithme convergent.

Analyse des estimations des paramètres

Paramètre	DL	Estimation	Erreur type	Limites de confiance à 95 %	de Wald	Chi-carré	Pr > chi carré
Ord_à_l'orig	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000		
Person_en_c	1	0,3426	0,0865	0,1730	0,5121	15,68	<0,0001
nb_voiesf	1	-0,2262	0,1106	-0,4430	-0,0094	4,18	0,0409
angle_int	1	0,0069	0,0027	0,0015	0,0122	6,38	0,0115
vit_trains	1	0,0250	0,0030	0,0191	0,0309	68,33	<0,0001
Dispersion	1	1,9615	0,1262	1,7292	2,2250		

NOTA : Le paramètre de dispersion binominal négatif a été établi selon la méthode de vraisemblance maximale.

Pour le modèle BN, la somme des carrés pondérée et le X^2 de Pearson sont proches de l'unité. Ce modèle rend compte d'une grande partie de la surdispersion constatée dans le modèle de Poisson. **C'est donc le modèle BN qui a été retenu pour prévoir les conséquences des collisions aux passages à niveau, au Canada.**

5.2.4 Ajustement bayésien empirique des résultats du modèle des conséquences de Poisson

Nous avons ensuite tenté un ajustement bayésien empirique (BE) du modèle des conséquences de Poisson initial. Le modèle BE intègre les données empiriques et les estimations du modèle de Poisson pour fournir une représentation plus exacte des collisions observées à chaque passage à niveau.

Pour élaborer le modèle BE, nous avons réparti les données concernant les 720 passages à niveau dans deux échantillons, selon un critère temporel : 456 passages à niveau pour la période de 1997 à 1999, pour le calage du modèle (y compris le calcul de la valeur K et de la valeur α), et 264 passages à niveau pour la validation du modèle. Pour ces 264 passages à niveau, nous avons utilisé les données empiriques des collisions survenues de 1997 à 1999 comme paramètres de l'équation du modèle BE. Ces données empiriques consistaient dans le nombre de collisions par année pour les trois ans allant de 1997 à 1999. Ce nombre était comparé aux collisions signalées à ces mêmes passages à niveau pour la période de 2000 à 2001. Une valeur K de 2,15 a été calculée au

moyen de la méthode itérative BE. Cette valeur a servi à calculer un facteur α pour chaque passage à niveau.

Aucun des 264 passages à niveau de l'échantillon de validation n'a enregistré de collision au cours de la période de 1997 à 1999. Cela signifie que le modèle BE reposait exclusivement sur les estimations du modèle de Poisson corrigées en fonction de α, lesquelles étaient marquées par la surdispersion. Le modèle BE a donc été abandonné. À mesure que la base de données empiriques s'enrichira, avec le temps, il conviendra de vérifier à nouveau le bien-fondé du modèle BE pour prévoir les conséquences des collisions aux passages à niveau.

6 DÉTERMINATION DES POINTS NOIRS ET ANALYSE

Au cours de la présente analyse, deux méthodes ont été envisagées pour la détermination des points noirs : 1) un graphique à deux dimensions, et 2) un indice de risque combiné. La première méthode consistait à représenter la fréquence et les conséquences des collisions sur les deux axes d'un graphique à deux dimensions (voir la figure 1.3). Des valeurs de seuil critique ont été superposées sur ce graphique, de façon à faire ressortir les passages à niveau où les fréquences et/ou les cotes de conséquences prévues par les modèles atteignent des niveaux inacceptables. Ce sont ces passages qui sont désignés «points noirs». Par ailleurs, nous avons aussi établi, pour chaque passage à niveau, un indice de risque combiné qui est obtenu en multipliant la fréquence prévue des collisions par la cote de conséquences (étant donné une collision). Encore là, on peut mettre cet indice en rapport avec des seuils prédéfinis pour déterminer quels passages à niveau doivent être visés par une intervention.

Le nombre de passages à niveau désignés «points noirs» et ciblés pour une intervention en sécurité dépend des seuils définis pour la fréquence, les conséquences et le risque. Naturellement, plus ces seuils sont bas, plus le nombre de passages à niveau désignés «points noirs» est élevé. Et plus le nombre de points noirs est élevé, plus le coût des interventions augmente. Pour fixer des seuils réalistes, il faut réaliser un équilibre entre l'efficacité d'une intervention sur le plan de la sécurité et son coût. Et sans connaître l'efficacité et le coût d'une intervention, il est impossible de fixer des seuils réalistes pour la détermination des points noirs. Or, une telle analyse du rapport coût-efficacité dépasse la portée de la présente étude.

Cette partie du rapport présente brièvement les méthodes (graphique et indice de risque combiné) qui ont servi à déterminer les points noirs, ainsi que le nombre de points noirs découlant de l'application de divers seuils. On y examine enfin les grandes caractéristiques d'un échantillon de passages à niveau dits «points noirs» tiré des données canadiennes.

6.1 Détermination des points noirs – Méthode graphique

Un total de 10 797 observations de passages à niveau répartis dans toutes les régions du Canada ont été prises en compte aux fins de la détermination des points noirs. Pour chaque passage à niveau, la fréquence des collisions et les conséquences de chaque collision ont été prévues à l'aide des modèles ci-dessus, compte tenu de différentes caractéristiques liées au passage à niveau et de différentes valeurs de DJMA et de vitesse. Pour prévoir la fréquence, nous avons utilisé le modèle de Poisson exprimé par les équations 4.2 à 4.4, tandis que pour prévoir les conséquences, nous avons utilisé le modèle BN exprimé par l'équation 5.3.

La fréquence et les conséquences des collisions à chaque passage à niveau ont été représentées sur un graphique (voir la figure 6.1). La figure 6.2 montre la répartition des passages à niveau selon le risque par année (ou produit de la fréquence prévue multipliée par la cote de conséquences prévue). À la figure 6.1, l'axe horizontal représente les conséquences prévues en un an pour toutes les collisions à chaque passage à niveau, tandis que l'axe vertical représente la fréquence annuelle prévue des collisions à ce passage à niveau. Trois seuils de risque ont été étudiés : les passages à niveau où la fréquence prévue des collisions et/ou la cote des conséquences prévues est dépassée, étant donné des seuils de 0,1 p. 100, 0,2 p. 100 et 0,5 p. 100.

La figure 6.1 montre que les passages à niveau où les collisions sont fréquentes diffèrent de ceux où les cotes de conséquences sont élevées. Ainsi, des points noirs déterminés sur la base d'un seul critère donneraient une fausse représentation des passages à niveau où une intervention s'impose. Il faut donc se garder d'utiliser séparément le critère de la fréquence ou des conséquences, mais plutôt utiliser les deux, pour obtenir un tableau complet du risque associé à chaque passage à niveau.

La figure 6.2 illustre une autre façon de déterminer les points noirs, à savoir à un indice de risque combiné. Il convient de noter que 97 p. 100 des passages à niveau sont sous le seuil de risque/année (fréquence multipliée par cote de conséquences) de 0,1 p. 100. Un total de 269 passages à niveau dépassent ce seuil. Dans le cas où la méthode de l'indice de risque combiné serait retenue, il serait tentant de désigner ces passages à niveau comme étant des points noirs.

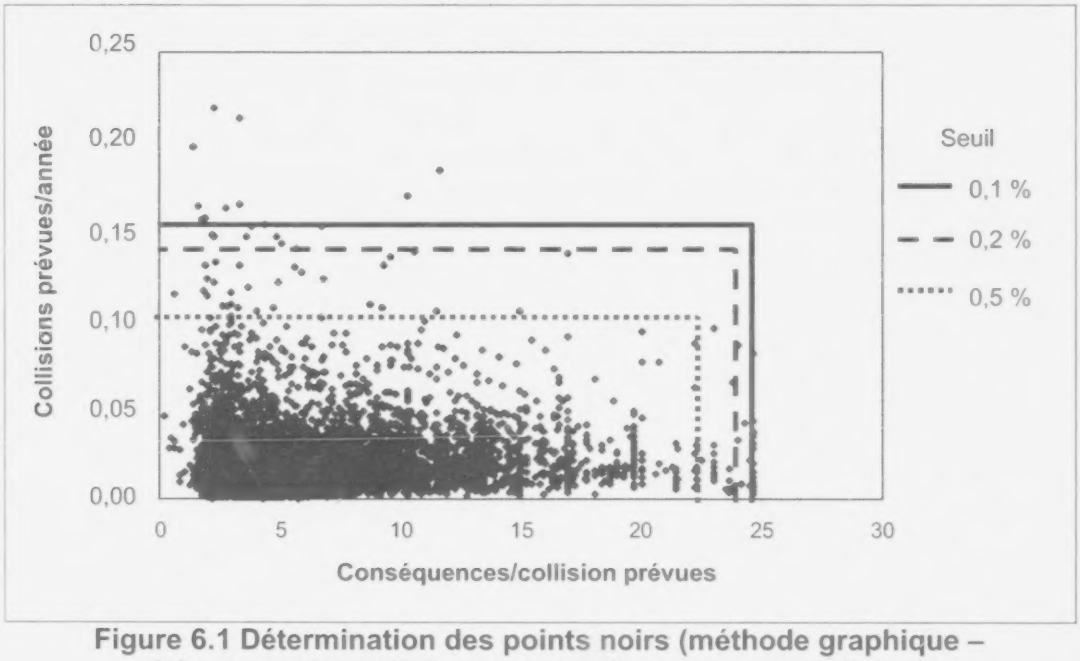


Figure 6.1 Détermination des points noirs (méthode graphique – fréquence des collisions et conséquences par collision)

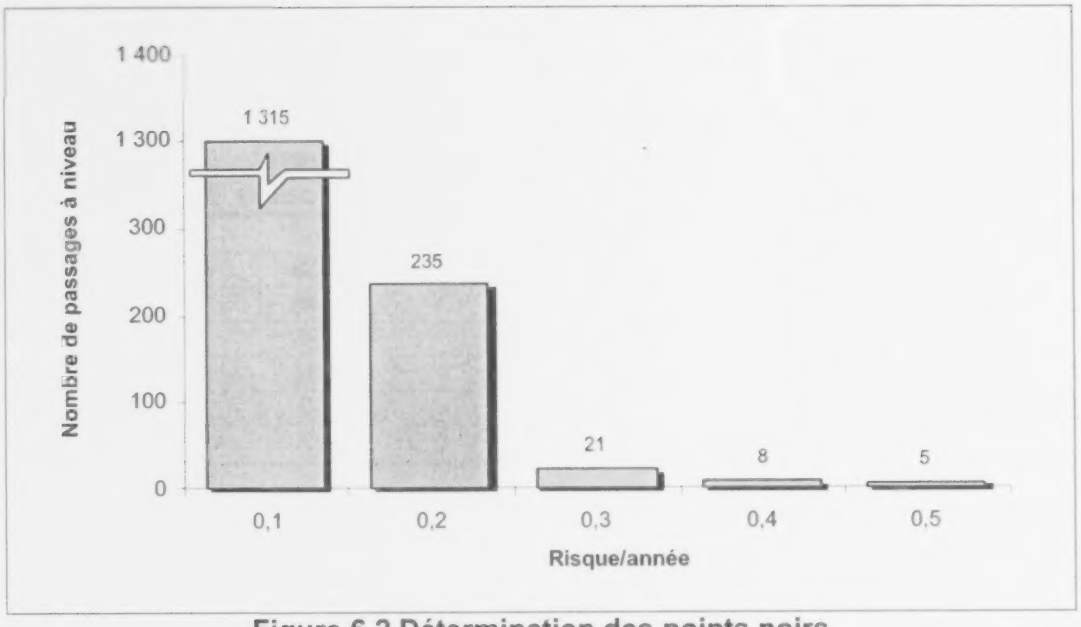


Figure 6.2 Détermination des points noirs (méthode de l'indice de risque combiné)

Nous avons retenu, aux fins de la présente étude, la méthode graphique qui met en rapport la fréquence et les conséquences pour déterminer les points noirs. Deux raisons expliquent ce choix : 1) en combinant la fréquence et les conséquences en un seul indice de risque, il y a danger que les passages à niveau associés à un grand nombre de collisions bénignes et ceux associés à de rares collisions graves soient représentés par un faible indice de risque et donc exclus de tout programme d'intervention en sécurité; 2) de plus, il est possible que des cas de fréquence élevée/faibles conséquences et de faible fréquence/graves conséquences aboutissent à un même indice de risque, mais nécessitent des stratégies d'intervention différentes. En se fiant uniquement à un indice de risque, il est plus difficile de concevoir des stratégies d'intervention taillées sur mesure pour un passage à niveau donné. En effet, il est fort probable que les contre-mesures différeront selon qu'on souhaite réduire la fréquence des collisions ou atténuer les conséquences des collisions.

6.2 Choix du seuil

En définitive, le nombre de points noirs dépend du seuil choisi. Par exemple, en fixant le seuil à 0,5 p. 100, on obtient 104 points noirs, soit 104 passages à niveau associés à des valeurs de fréquence et/ou de conséquences qui dépassent le seuil. Pour un seuil de 0,2 p. 100, le nombre de points noirs n'est plus que de 42, et de 22 pour un seuil de 0,1 p. 100. Le tableau 6-1 établit le rapport entre le seuil de risque et le nombre de points noirs, étant donné sept seuils allant de 0,9 p. 100 à 0,1 p. 100.

La grande question à laquelle on doit répondre est la suivante : quel seuil choisir pour accroître la sécurité au meilleur coût possible?

Tableau 6-1 Nombre de points noirs (selon la fréquence et les conséquences)

Seuil en pourcentage	Nombre de points noirs
0,9 %	188
0,8 %	166
0,7 %	146
0,6 %	126
0,50 %	104
0,20 %	42
0,10 %	22

6.2.1 Examen des seuils

Il est possible de déterminer un seuil optimal d'après les résultats d'une analyse détaillée des coûts et avantages reliés aux diverses interventions envisagées. Mais en l'absence d'une telle analyse, nous supposons que plus le nombre de passages à niveau désignés «points noirs» est élevé, plus le coût des interventions est élevé. Quant aux avantages, on peut les voir comme la réduction du risque (fréquence et conséquences) découlant de chaque intervention.

Les figures 6.3, 6.4 et 6.5 illustrent la relation entre la fréquence des collisions, les conséquences des collisions et le risque, d'une part, et le nombre des points noirs selon différents seuils, d'autre part. Il convient de noter l'absence de point d'«inflexion», c.-à-d. d'un point où les avantages commencent à progresser moins fortement par rapport aux seuils. Au contraire, la courbe décrit une relation croissante monotone. Ainsi, en l'absence d'un tel point d'inflexion, plus le nombre de passages à niveau désignés points noirs (et corrigés) sera élevé, plus le réseau sera sûr. Il serait intéressant d'étudier cette relation sous l'angle des gains de sécurité en fonction de différentes contraintes budgétaires. Pour les besoins de la démonstration, dans le présent rapport, nous avons fixé le seuil à 0,1 p. 100.

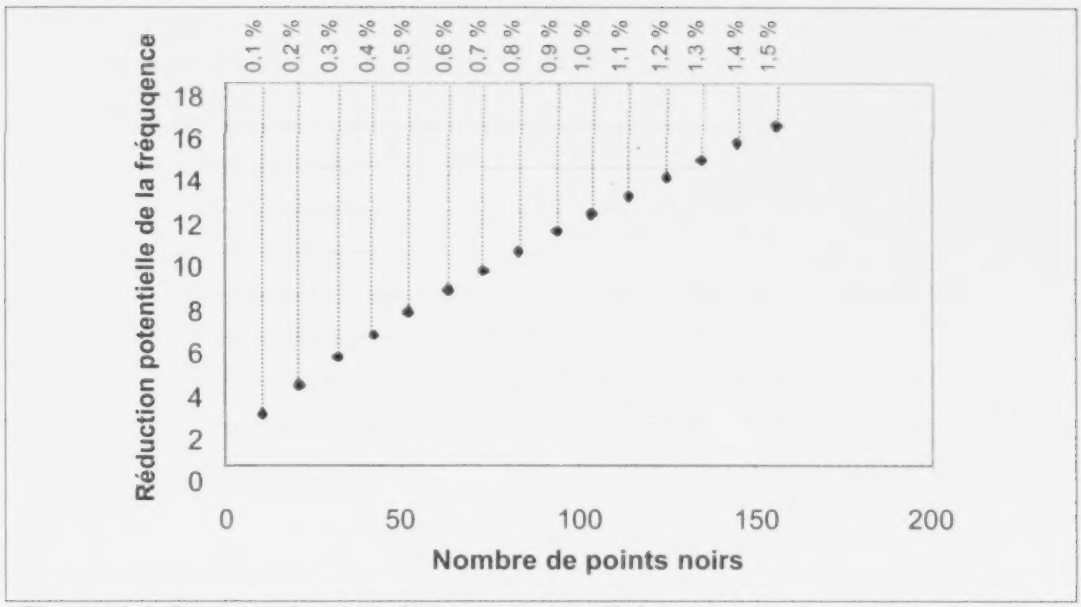


Figure 6.3 Comparaison coûts-avantages (fréquence par année en fonction du nombre de points noirs)

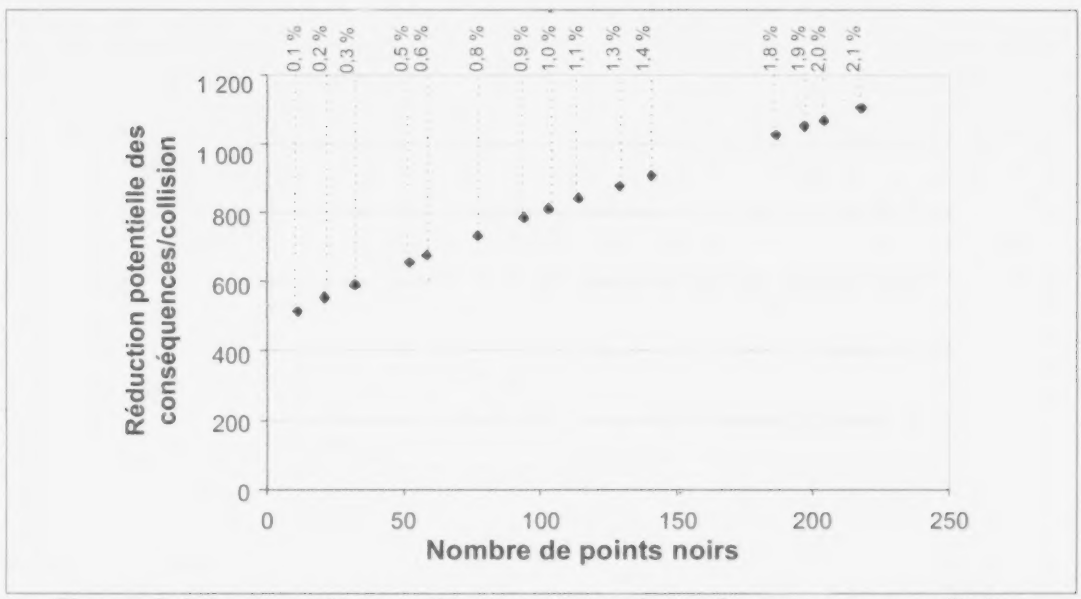


Figure 6.4 Comparaison coûts-avantages (conséquences par collision en fonction du nombre de points noirs)

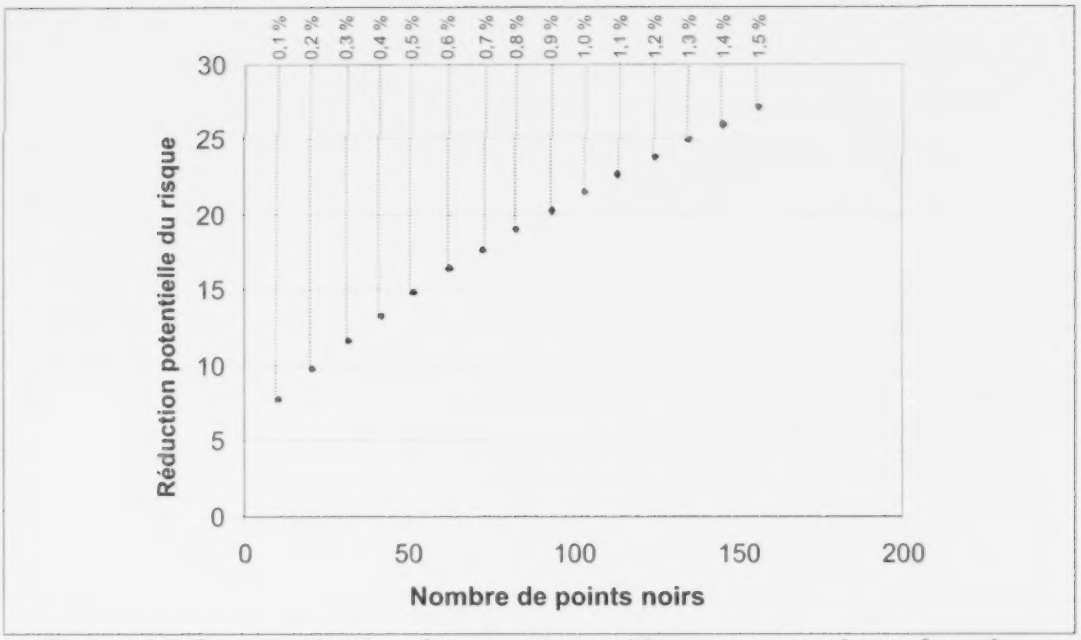


Figure 6.5 Comparaison coûts-avantages (risque par année en fonction du nombre de points noirs)

6.3 Caractéristiques moyennes des passages à niveau désignés points noirs

Cent passages à niveau ont été choisis au hasard dans l'échantillon des passages à niveau non désignés «points noirs» et ils ont été comparés aux 100 points noirs associés aux fréquences et aux cotes de conséquences les plus élevées). Le tableau 6-2 donne les valeurs moyennes de certaines variables caractérisant les deux échantillons de passages à niveau «ordinaires» et «points noirs». En moyenne, les points noirs sont associés à des limites de vitesse des trains plus élevées, à des angles d'intersection route/voie ferrée plus aigus (par rapport à la perpendiculaire), à des vitesses permises sur la route plus élevées et à des débits de circulation routière et ferroviaire plus élevés que les passages à niveau non désignés points noirs.

Tableau 6-2 Valeurs moyennes caractérisant les passages à niveau points noirs et les autres

Valeur moyenne	Points noirs	Autres
Limite de vitesse des trains (mi/h)	65,51	39,3
Vitesse permise sur la route (km/h)	64,20	60,65
Nombre de trains/jour	32,04	7,58
DJMA	10 835,38	2 717,42
Largeur de la surface de croisement (pi)	15,71	11,33
Nombre de voies ferrées	1,46	1,27
Angle d'intersection	75,99	71,01

6.4 Examen des passages à niveau désignés points noirs

En fixant le seuil à 0,1 p. 100 tant pour la fréquence que pour les conséquences des collisions, nous avons déterminé 22 points noirs (11 pour la fréquence et 11 pour les conséquences). Les tableaux 6-3 et 6-4 donnent l'emplacement de ces deux groupes de passages à niveau désignés points noirs selon le critère de la fréquence et des conséquences, respectivement. Ces 22 points noirs sont ensuite comparés aux 22 passages à niveau associés aux fréquences les plus élevées et aux conséquences les plus graves, selon les données historiques compilées pour la période de 1997 à 2001. Les résultats de cette comparaison sont présentés aux tableaux 6-5 et 6-6.

Les 22 passages à niveau à risque maximal, selon les données historiques de fréquence et de conséquences, sont davantage dispersés géographiquement sur le territoire canadien que les 22 passages à niveau désignés les pires points noirs, selon les fréquences et les conséquences prévues par les modèles. En effet, ces derniers sont plutôt regroupés dans quelques régions du pays. Nous notons en outre qu'aucun passage à niveau ne se trouve à la fois dans les deux listes de points noirs établies respectivement selon les conséquences et la fréquence des collisions.

D'après les données historiques sur la fréquence des collisions, des 11 passages à niveau où sont survenues le plus de collisions, quatre sont situés en Saskatchewan, trois au Manitoba, deux en Ontario et deux au Québec. D'après les données historiques sur les conséquences des collisions, des 11 passages à niveau associés aux conséquences les plus graves, six sont situés en Ontario, trois en Alberta, un en Saskatchewan et un au Québec.

D'après les modèles de prévision, des 11 passages à niveau où la fréquence prévue des collisions est la plus élevée, six sont situés en Saskatchewan, trois en Ontario, un en Alberta et un au Nouveau-Brunswick. Du point de vue de la gravité prévue des conséquences, cinq des 11 passages à niveau au sommet de la liste des points noirs sont situés en Ontario et six au Québec.

Les 11 passages à niveau où les conséquences prévues sont les plus graves diffèrent des 11 où la fréquence prévue est la plus élevée, ce qui laisse penser que les deux critères donnent des résultats radicalement différents. Une telle constatation renforce l'importance d'avoir un modèle de prévision qui tienne compte à la fois de la fréquence et des conséquences des collisions pour déterminer les points noirs.

Les 11 passages à niveau associés aux fréquences les plus élevées et aux conséquences les plus graves, selon les données historiques, sont plutôt dispersés dans l'ensemble du Canada, tandis que les 11 passages à niveau associés aux fréquences les plus élevées et aux conséquences les plus graves, selon les prévisions, sont regroupés en Ontario et en Saskatchewan. Cela donne

à penser que si l'on se fiait aux données historiques pour déterminer les points noirs, on n'aurait pas une représentation juste des risques potentiels que présentent les passages à niveau. Le risque potentiel ne peut être déterminé qu'en appliquant les deux modèles de fréquence et de conséquences prévues.

Tableau 6-3 Liste des points noirs selon la fréquence prévue des collisions par année

TC_NO	Fr./an	Rang	Système d'avertis-sement	Province	Municipalité	Rue
30438	0,219	1	F	Sask.	Saskatoon	22e Rue
12651	0,213	2	F	Sask.	Regina	rue Albert (Route 6)
12833	0,197	3	F	Sask.	Regina	Rue Pasqua
16972	0,184	4	S	Sask.	Corman Park Number 344	21-22-36-6
30951	0,169	5	F	Ont.	Tilbury East	Chemin Essex 22
12640	0,165	6	F	Sask.	Regina	Chemin Ring
8281	0,163	7	F	Ont.	Oshawa	Rue Adélaïde
28813	0,163	8	F	Sask.	Saskatoon	3e Avenue Nord
30240	0,157	9	F	N.-B.	Saint John	Rue Main
20573	0,156	10	F	Ont.	Onaping Falls	Cartier Hy
24833	0,153	11	G	Alb.	Calgary	Promenade Heritage

Tableau 6-4 Liste des points noirs selon les conséquences prévues par collision

TC_NO	Conséq./ collision	Syst. avert.	Province	Municipalité	Rue
4843	24,65	G	Qc	Saint-Cyrille-de-Wendover	Chemin du 3e Rang
4863	24,65	G	Qc	Saint-Simon	Rang Saint-Georges
4860	24,65	F	Qc	Sainte-Hélène-de-Bagot	Chemin du 2e Rang Est
36581	24,65	G	Ont.	Wolford	Chemin de comté 16
3261	24,65	G	Ont.	Maidstone	Chemin Rourke
4788	24,65	S	Qc	Val-Alain	Route du 3e
4852	24,65	F	Qc	Saint-Germain-de-Grantham	Chemin du 8e Rang
4858	24,65	F	Qc	Sainte-Hélène-de-Bagot	Rang Saint-Augustin
3258	24,65	G	Ont.	Belle River	Chemin Ducharme
19647	24,65	F	Ont.	Wolford	Chemin Kilmarnock
300759	24,65	G	Ont.	Tilbury North	Chemin Couture

Tableau 6-5 Liste des points noirs selon les données historiques sur la fréquence des collisions (1997-2001)

TC_NO	Nombre de collisions	Rang	Syst. avert.	Province	Municipalité	Rue
32379	6	1	F	Ont.	Niagara Falls	Ch. Reg 102, Clifton
28813	5	2	F	Sask.	Saskatoon	3e Avenue Nord
18061	4	3	F	Qc	Saint-Jean-sur-Richelieu	Chemin Grand-Bernier
23696	4	4	F	Man.	Winnipeg	Avenue Kimberly
24123	3	5	G	Sask.	Regina	Avenue Ross
17073	3	6	S	Sask.	Senlac Number 411	Route de section 675
7044	3	7	G	Ont.	Brampton	Chemin Torbram
13174	3	8	G	Man.	Portage-la-Prairie	Rue Third
23164	3	9	G	Sask.	Sherwood Number 159	Municipal Road
21521	3	10	G	Man.	Winnipeg	Rue Marion
10492	3	11	G	Qc	Montréal	Rue de Courcelles

Tableau 6-6 Liste des points noirs selon les données historiques sur les conséquences des collisions (1997-2001)

TC_NO	Total morts	Total bless.	Rang	Syst. avert.	Province	Municipalité	Rue
6398	4	1	1	G	Ont.	Halton Hills	4e Chemin de canton
5019	3	0	2	S	Ont.	Ingersoll	Avenue Mckeand
7091	2	0	3	G	Ont.	Halton Hills	Chemin Derry Reg. 25
32033	2	0	4	F	Ont.	Cambridge	Rue Dolph
19657	2	0	5	G	Ont.	Elizabethtown	Chemin de comté 28
27477	2	0	6	S	Alb.	Mountain View County Number 17	Ns W15-33-1-5
35559	2	1	7	F	Sask.	Arlington Number 79	Route Yellowhead (16)
36755	2	0	8	S	Alb.	Leduc County Number 25	Chemin de concession 245
713	2	1	9	F	Ont.	Whitchurch-Stouffville	Chemin Slater
21282	2	2	10	F	Alb.	Crowsnest Pass	9e Avenue
18061	1	1	11	F	Qc	Saint-Jean-sur-Richelieu	Chemin Grand-Bernier

Selon la liste des points noirs donnée au tableau 6-3, les 11 passages à niveau associés aux prévisions de plus fortes fréquences de collisions sont situés dans des zones urbaines, particulièrement en Saskatchewan. Sur le plan des conséquences, les 11 passages à niveau associés aux prévisions les plus pessimistes sont surtout situés dans des zones rurales, particulièrement en

Ontario. Les figures 6.6 et 6.7 montrent l'emplacement des points noirs situés en Ontario.

Une cause possible de la concentration des points noirs «haute fréquence» dans les zones urbaines est que ces passages à niveau sont normalement associés à des débits de circulation routière élevés, qui caractérisent habituellement les zones urbaines. Dans les zones rurales, par contre, autant les trains que les véhicules routiers franchissent les passages à niveau à des vitesses plus élevées qu'en zone urbaine. Il s'ensuit que les conséquences des collisions ont tendance à être plus graves.

Les 11 passages à niveau où les conséquences prévues par collision sont les plus graves sont aussi ceux où la limite de vitesse des trains est la plus élevée, comparativement aux 11 passages où la fréquence prévue des collisions est la plus élevée. Ainsi, la valeur moyenne de la vitesse des trains pour les 11 passages à niveau à conséquences graves est de 95 mi/h, ce qui dépasse de beaucoup la moyenne de 54 mi/h pour les passages à niveau à haute fréquence. Cela confirme que la limite de vitesse des trains a un effet plus prononcé sur la gravité que sur la fréquence des collisions.

Figure 6.6 Points noirs situés en Ontario, au niveau de la municipalité, selon la fréquence prévue des collisions par année et les conséquences prévues par collision

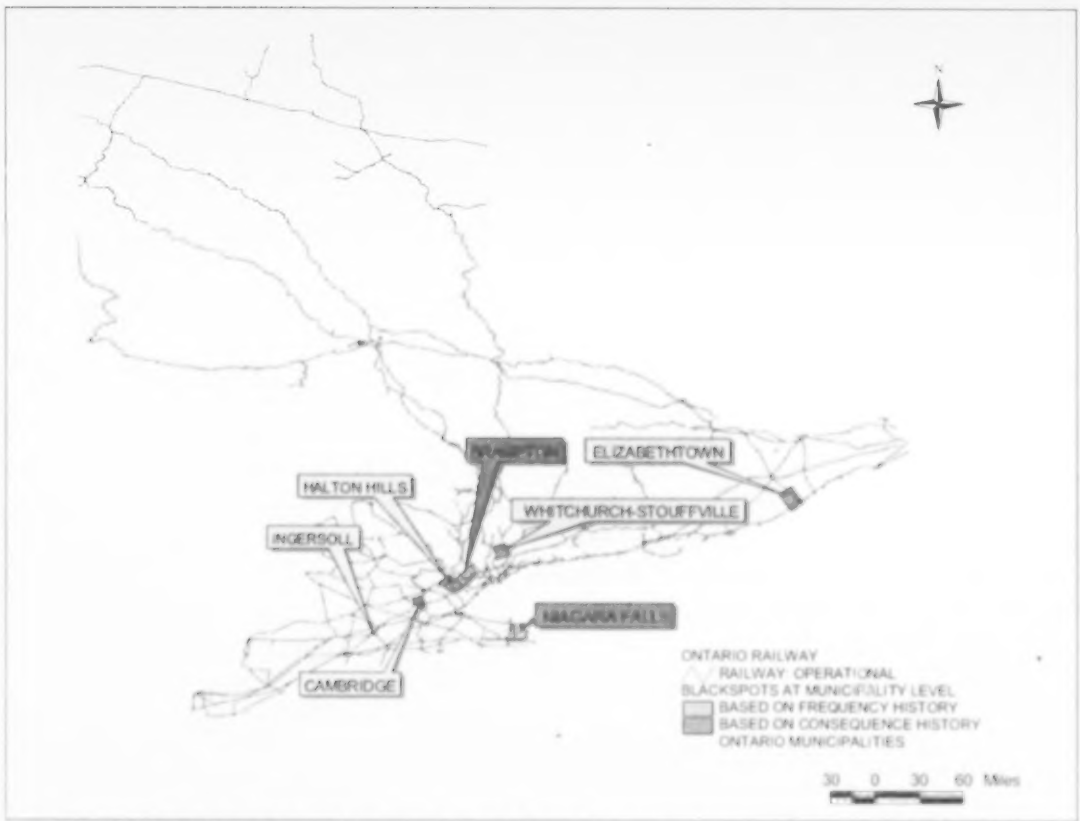


Figure 6.7 Points noirs situés en Ontario, au niveau de la municipalité, selon les données historiques sur la fréquence et les conséquences des collisions

Ontario. Les figures 6.6 et 6.7 montrent l'emplacement des points noirs situés en Ontario.

Une cause possible de la concentration des points noirs «haute fréquence» dans les zones urbaines est que ces passages à niveau sont normalement associés à des débits de circulation routière élevés, qui caractérisent habituellement les zones urbaines. Dans les zones rurales, par contre, autant les trains que les véhicules routiers franchissent les passages à niveau à des vitesses plus élevées qu'en zone urbaine. Il s'ensuit que les conséquences des collisions ont tendance à être plus graves.

Les 11 passages à niveau où les conséquences prévues par collision sont les plus graves sont aussi ceux où la limite de vitesse des trains est la plus élevée, comparativement aux 11 passages où la fréquence prévue des collisions est la plus élevée. Ainsi, la valeur moyenne de la vitesse des trains pour les 11 passages à niveau à conséquences graves est de 95 mi/h, ce qui dépasse de beaucoup la moyenne de 54 mi/h pour les passages à niveau à haute fréquence. Cela confirme que la limite de vitesse des trains a un effet plus prononcé sur la gravité que sur la fréquence des collisions.

Figure 6.6 Points noirs situés en Ontario, au niveau de la municipalité, selon la fréquence prévue des collisions par année et les conséquences prévues par collision

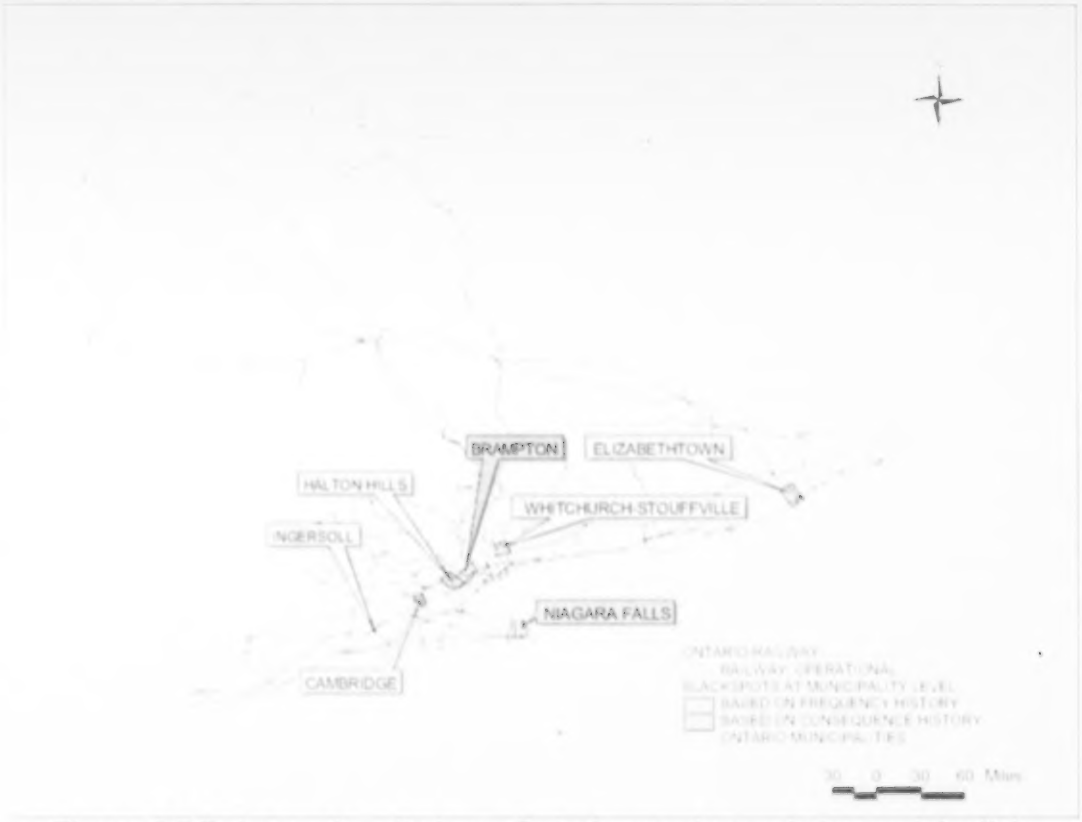


Figure 6.7 Points noirs situés en Ontario, au niveau de la municipalité, selon les données historiques sur la fréquence et les conséquences des collisions

7 CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

7.1 Conclusions

La présente recherche propose une méthode fondée sur l'appréciation du risque pour déterminer les points noirs parmi les passages à niveau au Canada. Les grandes conclusions tirées des travaux sont résumées ci-après.

Modélisation de la fréquence des collisions

1. Divers modèles pouvant être utilisés pour prédire les collisions aux passages à niveau ont été étudiés. La distribution de Poisson s'est révélée donner des résultats semblables à ceux obtenus par les méthodes binomiale négative et bayésienne empirique. Des modèles distincts de prévision des collisions ont été établis pour chacun des trois types de systèmes d'avertissement étudiés. Ces modèles donnaient de meilleures prévisions qu'une équation unique dans laquelle le système d'avertissement comptait pour une variable indépendante. Ces résultats se sont avérés concorder avec ceux du modèle US DOT pour la prévision des collisions aux passages à niveau. Nous avons donc conclu que la régression de Poisson assortie d'équations distinctes pour différents types de systèmes d'avertissement offre la meilleure représentation de la fréquence prévue des collisions. En l'occurrence, nous avons utilisé trois types de systèmes d'avertissement : panneaux indicateurs, feux clignotants et barrières.

2. L'analyse statistique a mené à la conclusion que l'exposition à la circulation (DJMA x nombre de trains par jour) est le facteur qui influe le plus sur la fréquence des collisions, quel que soit le type de passage à niveau. Cette relation est non linéaire et elle est influencée par le type de système d'avertissement. Pour les passages à niveau non automatisés (c.-à-d. munis uniquement de panneaux indicateurs), la limite de vitesse des trains et l'exposition à la circulation expliquaient de façon significative les différences constatées dans le nombre prévu de collisions par année. Pour les passages à niveau automatisés équipés de feux clignotants, les variables significatives étaient la limite de vitesse des trains, la largeur de la chaussée et l'exposition à la circulation. Dans le cas des passages à niveau munis de barrières, les variables significatives pour la prévision de la fréquence étaient la vitesse permise sur la route, le nombre de voies ferrées et l'exposition à la circulation. Encore une fois, ces résultats concordaient raisonnablement avec ceux des modèles US DOT.

Les équations de la fréquence des collisions pour chaque type de système d'avertissement se présentent comme suit (tableau 7-1) :

Tableau 7-1 Modèles de prévision de la fréquence des collisions

Système d'avertissement	Modèles de fréquence des collisions
Panneaux indicateurs	$E(m_S) = e^{[-5,66 + 0,0128 * TSPD + 0,3791 * \ln (EXPO)]}$
Feux clignotants	$E(m_F) = e^{[-9,1620 + 0,0112 * TSPD + 0,0151 * SW + 0,6103 * \ln (EXPO)]}$
Barrières	$E(m_G) = e^{[-7,2304 + 0,0118 * RSPD + 0,1912 * TN + 0,3526 * \ln (EXPO)]}$

Où : *TSPD* = Limite de vitesse des trains (mi/h)
EXPO = Produit croisé du DJMA et du nombre de trains par jour
SW = Largeur de la surface de croisement (pi)
RSPD = Vitesse permise sur la route (km/h)
TN = Nombre de voies ferrées (dans les deux sens)

Modélisation des conséquences des collisions

3. Une cote de conséquences a été établie d'après les coûts moyens associés aux différents niveaux de gravité des conséquences résultant d'une collision (collision mortelle, collision avec blessures et dommages matériels). Le recours à une cote de conséquences unique permettait de représenter tout le spectre des conséquences associées à chaque collision et de l'inclure dans la méthode de détermination des points noirs. Comme pour la fréquence, différents modèles de prévision ont été évalués. C'est le modèle binomial négatif qui s'est révélé le mieux apte à prévoir la gravité des conséquences des collisions aux passages à niveau.

4. La variable «type de système d'avertissement» ne s'est pas révélée statistiquement significative pour expliquer les conséquences (la gravité) d'une collision, comme elle l'était pourtant dans le modèle de fréquence des collisions. La limite de vitesse des trains, le nombre de voies ferrées, l'angle d'intersection, le nombre de véhicules et de personnes en cause se sont toutefois révélés avoir un effet significatif sur les conséquences prévues d'une collision à un passage à niveau. Dans le modèle de prévision des conséquences, il est supposé qu'une collision a eu lieu.

Voici le modèle de prévision des conséquences recommandé pour déterminer les points noirs :

$$E(C_q/C) = e^{(0,3426 * PI - 0,2262 * TN + 0,0069 * TA + 0,0250 * TSPD)} \quad \textbf{(5.3)}$$

Où : $E(C_q/C)$ = Conséquence/collision prévues
PI = Nombre de personnes en cause

TN = Nombre de voies ferrées (dans les deux sens)
TA = Angle d'intersection (degrés)
TSPD = Limite de vitesse des trains (mi/h)

Analyse du risque et détermination des points noirs

5. Sur un graphique à deux dimensions, on a comparé les risques prévus (fréquence et conséquences) pour chaque passage à niveau. Dans ce graphique de délimitation du risque, l'axe des «Y» représente la fréquence prévue des collisions, l'axe des «X» les conséquences prévues, et chaque point, un passage à niveau. Le regroupement de tous les passages à niveau sur ce graphique permet de cerner facilement ceux qui sont à haut risque (les points noirs) et ce, à la grandeur du réseau ferroviaire.

6. Le graphique de la fréquence en fonction des conséquences a servi à déterminer les passages à niveau où la fréquence et/ou les conséquences des collisions atteignent un niveau inacceptable, et qui doivent être désignés «points noirs». Idéalement, les points noirs doivent être déterminés selon des seuils de risque établis d'après une appréciation claire et objective des préférences de la société et de la tolérance au risque. Ainsi, une diminution potentielle du risque peut être mise en rapport avec une augmentation des coûts occasionnée par la mise en place de différentes contre-mesures. Une telle analyse déborde toutefois la portée de la présente étude. Mais pour les besoins de la démonstration du modèle, dans le présent rapport, nous avons classé les passages à niveau de la base de données BDEF/SIFF selon la fréquence et les conséquences des collisions auxquelles ils sont associés. Les passages à niveau où la fréquence ou les conséquences prévues des collisions étaient dépassées, étant donné un seuil de risque de 0,1 p. 100, ont été désignés points noirs. Ce seuil de 0,1 p. 100 a été établi arbitrairement. Dans l'exercice, différents seuils de risque ont été envisagés (de 0,1 p. 100 à 0,9 p. 100) pour la détermination des points noirs. Concrètement, nous avons constaté que selon le seuil utilisé, les coûts ou les budgets d'intervention pouvaient varier. Ainsi, le seuil de 0,9 p. 100 entraînerait des coûts plus élevés que le seuil de 0,1 p. 100, car davantage de passages à niveau seraient désignés comme points noirs nécessitant une intervention en sécurité.

Détermination des points noirs parmi les passages à niveau du Canada

7. Une liste de points noirs a été dressée d'après la fréquence et les conséquences prévues des collisions à chaque passage à niveau du Canada, selon le seuil accepté de 0,1 p. 100. Les points noirs ainsi identifiés étaient surtout situés en Saskatchewan (en raison du fort débit de circulations ferroviaires) ainsi qu'en Ontario et au Québec (en raison des conséquences élevées des collisions). La plupart des points noirs attribuables à la fréquence des collisions étaient situés dans des zones urbaines caractérisées par un fort DJMA. Quant aux points noirs définis comme tels en raison des conséquences

des collisions, ils étaient généralement situés dans des zones rurales, où la limite de vitesse des trains est élevée, mais pas nécessairement le DJMA.

8. Le Canada a enregistré une baisse sensible du nombre de collisions aux passages à niveau ces 20 dernières années. Les modèles du risque élaborés dans le cadre de la présente recherche font envisager un nombre moindre de collisions aux passages à niveau équipés de feux clignotants et de barrières qu'à ceux munis uniquement de panneaux indicateurs. Cela pourrait expliquer la tendance à la baisse du nombre des collisions, avec le temps. En effet, cette baisse pourrait être due au nombre croissant de passages à niveau auxquels on ajoute des dispositifs d'avertissement automatisés (en particulier des barrières). Cette assertion demande toutefois à être examinée à fond, surtout dans un contexte où les normes de déclaration des collisions (seuils de gravité) évoluent et où l'on ferme des passages à niveau.

7.2 Recommandations

La présente recherche est le premier pas vers l'établissement d'un cadre intégré de gestion du risque aux passages à niveau du Canada. Pour atteindre l'objectif d'accroître la sécurité aux passages à niveau, des efforts considérables doivent être consentis pour améliorer les modèles de prévision du risque et déterminer les points noirs parmi les passages à niveau. Par exemple, il y a lieu de mieux intégrer les modèles de prévision du risque résultant des présents travaux à un système d'aide à la décision (SAD) facile à utiliser, pour le développement et l'évaluation de contre-mesures offrant un bon rapport coût-efficacité. En alliant le SAD à un système d'information géographique (SIG), on peut réaliser différents niveaux d'agrégation spatiale (passage à niveau particulier, municipalité, province, pays, etc.). Les résultats du présent rapport indiquent clairement qu'un tel système n'est pas seulement possible, mais hautement souhaitable. Sont énumérés ci-après quelques thèmes sur lesquels on pourrait faire porter la recherche future.

1) ***Établir des facteurs de pondération plus précis.*** Le modèle des conséquences présenté ici est tributaire des facteurs de pondération utilisés pour combiner différents niveaux de dommages causés par une collision. Une analyse plus poussée s'impose pour établir des facteurs à partir d'un découpage précis de divers niveaux de gravité.

2) ***Combiner fréquence et conséquences des collisions.*** Il y a lieu d'étudier comment mieux combiner la fréquence et les conséquences des collisions de façon à déterminer de façon plus objective et plus précise les points noirs. Dans la méthode actuelle, la fréquence et les conséquences des collisions sont considérées comme d'égale importance et on leur attribue donc la même valeur. Il se pourrait qu'au terme d'une analyse approfondie, on se rende compte qu'il y a lieu de pondérer différemment la fréquence et les conséquences pour les combiner dans un indice de risque unique.

3) ***Définir des seuils de risque objectifs.*** Le seuil de risque utilisé pour déterminer les points noirs a une incidence directe sur le nombre de passages à niveau ciblés pour une intervention en sécurité. Idéalement, ce seuil devrait être établi à la lumière d'une analyse approfondie du rapport coût-efficacité (atténuation prévue du risque et coût des contre-mesures) associé à différentes contre-mesures. La méthode de recherche suggérée (fondée sur la relation entre le nombre de passages à niveau considérés comme des points noirs et nécessitant une intervention en sécurité, d'une part, et la réduction potentielle de la fréquence et des conséquences des collisions, d'autre part) pourrait être élargie pour englober le coût de la mise en œuvre de contre-mesures précises.

4) ***Cerner les contre-mesures présentant le meilleur rapport coût-efficacité.*** Une fois dressée la liste des points noirs, une microanalyse des facteurs contributifs s'impose pour cerner les meilleures contre-mesures à appliquer à chaque point noir. Il convient aussi de mettre au point les méthodes pour évaluer le rapport coût-efficacité de chaque contre-mesure.

5) ***Élaborer un système d'aide à la décision fondé sur un système d'information géographique (SIG) pour la gestion du risque aux passages à niveau.*** Pour bien tirer profit de la méthode de détermination des points noirs et des modèles de délimitation du risque élaborés au cours des présents travaux, il y a lieu de développer un logiciel convivial à l'intention des divers intervenants concernés, comme les sociétés ferroviaires et les organismes provinciaux et municipaux oeuvrant en transport et en sécurité, pour traiter des questions de sécurité liées à la planification, la conception et l'exploitation des passages à niveau. Pour faciliter ce travail, il faut une meilleure spécification et un meilleur couplage du répertoire des passages à niveau, de la base de données sur les collisions et des données à référence spatiale.

6) ***Améliorer les données sur les collisions et sur les passages à niveau.*** La méthode fondée sur l'appréciation du risque proposée pour déterminer les points noirs repose sur un ensemble de modèles statistiques qui sont calés sur des observations de collisions survenues à des passages à niveau offrant diverses caractéristiques. Il est donc extrêmement important d'avoir une base de données précise et complète (un répertoire) des caractéristiques des passages à niveau et de l'historique des collisions. Nos travaux indiquent que la base de données BDEF/SIIF actuelle a besoin d'être améliorée sous les aspects suivants :

- La qualité des données consignées dans le SIIF doit être améliorée. Aux fins de notre analyse statistique, nous avons dû supprimer plus de la moitié des passages à niveau, pour cause de données manquantes ou erronées.
- La base de données devrait être assortie d'un système de références spatiales qui serait appliqué à tous les passages à niveau et à toutes les collisions. Chaque passage à niveau et collision devrait être géocodé, ce qui

permettrait d'effectuer des analyses à différents niveaux d'agrégation spatiale.

- Un meilleur couplage devrait être établi entre la BDEF et les données déclarées par la police concernant les collisions aux paliers régional, municipal et provincial. Ce couplage permettrait de contrevalider les données et donnerait accès à des données plus complètes sur les collisions.
- Il y aurait lieu d'améliorer l'information sur l'exposition à la circulation à chaque passage à niveau. Cette information comprend le nombre moyen de différents types de trains par jour, le DJMA et le nombre de circulations routière et ferroviaire selon l'heure du jour. Ces données devraient être colligées et structurées *tous les ans*.

RÉFÉRENCES ET BIBLIOGRAPHIE

Bonneson, J.A., and P.T. McCoy, "Estimation of Safety at Two-Way Stop-Controlled Intersections on Rural Highways", *Transportation Research Record 1401*, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 83-89, 1993.

Bureau de la sécurité des transports du Canada, «Accidents aux passages à niveau et nombre de victimes par province», www.tsb.gc.ca/fr/stats/rail/2001/rail.asp, visité en août 2002.

Bureau de la sécurité des transports du Canada, «Accidents aux passages à niveau et nombre de victimes selon le type de passage et de protection», www.tsb.gc.ca/fr/stats/rail/2001/rail.asp, visité en août 2002.

California Department of Transportation, "California Life-Cycle Benefit/Cost Analysis Model", Booz Allen & Hamilton Inc., CA, 1999.

Chang, L.Y., and F. Mannering, "Analysis of Injury Severity and Vehicle Occupancy in Truck – and Non-Truck-Involved Accidents", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 31, pp. 579-592, 1999.

Coleman, J., and G.R. Stewart, "Investigation of Accident Data for Railroad-Highway Grade Crossings", *Transportation Research Record 611*, TRB, National Research Council, Washington DC, pp. 60-67, 1976.

Daniel, J., C. Tsai, and S. Chien, "Factors Influencing Truck Crashes on Roadways with Intersections", *Transportation Research Board 81st Annual Meeting*, TRB, National Research Council, Washington, DC, 2002.

Direction 2006 «Qu'est ce que Direction 2006», www.direction2006.com/french/what_2006_fr.htm, visité en septembre 2002.

Direction 2006 «Qu'est ce que Opération Gareautrain», www.direction2006.com/french/whatis_ol_fr.htm, visité en septembre 2002.

Farr, E.H., "Rail-Highway Crossing Resource Allocation Model", U.S. Department of Transportation, Transportation Systems Center, Cambridge, MA, 1981.

Farr, E.H., "Summary of the DOT Rail-Highway Crossing Resource Allocation Procedure – Revised", U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Transportation Systems Center, Cambridge, MA, 1987.

Hauer, E., "Empirical Bayes Approach to the Estimation of Unsafety: the Multivariate Regression Method", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 24, Number 5, pp. 457-477, 1992.

Hauer, E., *Observational Before-After Studies in Road Safety*, First Edition, Pergamon, 1997.

Hauer E., "On the Estimation of the Expected Number of Accidents", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 18(1), pp. 1-12, 1986.

Hauer, E., and N.B. Persaud, "How to Estimate the Safety of Rail-Highway Grade Crossing and the Effects of Warning Devices", *Transportation Research Board 1114*, TRB, National Research Council, Washington DC, pp. 131-140, 1987.

Hitz, J.S., "Accident Severity Prediction Formula for Rail-Highway Crossings", *Transportation Research Record 956*, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1984.

Hutchinson, T.P., and A.J. Mayne, "The Year-to-Year Variability in the Numbers of Road Accidents", *Traffic Engineering and Control*, London, UK. 18(9), pp. 432-433, 1977.

Korve, H.W., "Traffic Signal Operations Near Highway-Railway Grade Crossings", Transportation Research Board, TRB, National Research Council, Washington, DC, 1999.

McCullagh, P., and J.A. Nelder, *Generalized Linear Models*, Longon, Chapman and Hall, 1989.

Miaou, S.P., "The Relationship Between Truck Accidents and Geometric Design of Road Sections: Poisson Versus Negative Binomial Regressions", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 26, Number 4, pp. 471-482, 1994.

Miaou, S.P., and H. Lum, "Modeling Vehicle Accidents and Highway Geometric Design Relationships", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 25, Number 6, pp. 689-709, 1993.

Miaou, S.P., and H. Lum, "Statistical Evaluation of the Effects of Highway Geometric Design on Truck Accident Involvements", *Transportation Research Record 1407*, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 11-23, 1993.

Miaou, S.P., and P.S. Hu, "Relationship Between Truck Accidents and Highway Geometric Design: A Poisson Regression Approach", *Transportation Research Record 1376*, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 10-18, 1992.

Myers, R.H., D.C. Montgomery, and G.G. Vining, *Generalized Linear Models with Applications in Engineering and Sciences*, Wiley Series in Probability and Statistics, John Wiley & Sons, Inc., 2002.

Nassar, S.A., *Integrated Road Accident Risk Model*, Ph.D. Dissertation, Dep. of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, ON, Canada, 1996.

Nassar, S.A., F.F. Saccomanno, and J. Shortreed, "Road Accident Analysis: A Micro Level Approach", *Canadian Journal for Civil Engineers*, Vol. 21, Number 5, pp. 847-855, 1994.

OECD Scientific Expert Group. "Road Safety Principles and Models: Review of Descriptive, Predictive, Risk and Accident Consequence models", www1.oecd.org/dsti/sti/transpor/road/prod/, visité en mars 2002.

Pedan, A., *Analysis of Count Data Using the SAS System*, Vasca Inc., Tewksbury, MA, 2001.

Persaud, B.N., "Blackspot Identification and Treatment Evaluation", Research Report TDS-90-04, Research and Development Branch, Ministry of Transportation, Nov. 1990.

Philipson, L., "Statistical Analyses of Highway Commercial Vehicle Accidents", *Accident Analysis and Prevention*, Vol. 13, pp. 289-306, 1988.

Research and Special Programs Administration, John A., Volpe National Transportation Systems Center, "Assessment of Risk for High-Speed Rail Grade Crossings on the Empire Corridor", U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, Cambridge MA, 2000.

Saccomanno, F.F., and C. Buyco, "Generalized Loglinear Models of Truck Accident Rate", *Transportation Research Record 1172*, TRB, National Research Council, Washington, DC, pp. 23-31, 1988.

Saccomanno, F.F., R. Grossi, D. Greco, and A. Mehmood, "Identifying Blackspots Along Highway SS107 in Southern Italy Using Two Models", *Journal of Transportation Engineering*, Volume 127, pp. 515-522, 2001.

SAS Institute. *SAS/Insight User's Guide Version 6*, Gary, NC., 1995.

Schoppert, D.W., and D.W. Hoyt, *Factors Influencing Safety at Highway-Railway Grade Crossings*, Highway Research Board, National Research Council, 1968.

Social Sciences Teaching And Research Statistics (SSTARS), "Poisson and Negative binomial Regression", www.uky.edu/ComputingCenter/SSTARS/P_NB_1.htm, visité en février 2002.

Transports Canada, «Statistiques sur les collisions de la route au Canada, 2000», www.tc.gc.ca/roadsafety/tp/tp3322/2000/fr/page1_f.htm, visité en juin 2002.

U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Motor Vehicle Accident Cost,
www.fhwa.dot.gov/legsregs/directives/techadvs/t75702.htm, visité en août 2002.

U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, "Highway and Rail Grade Crossings Inventory Data",
www.safetydata.fra.dot.gov/OfficeofSafety/Downloads/Default.asp?page=downloaddbf.asp, visité en janvier 2002.

U.S. Department of Transportation, Federal Railroad Administration, "*Railroad Safety Statistics Annual Report 2001*", Washington, DC, 2002.

ANNEXE A

RÉPARTITION DE L'ÉCHANTILLON DES PASSAGES À NIVEAU TIRÉ DE LA BASE DE DONNÉES BDEF/SIIF SELON DIVERSES VARIABLES

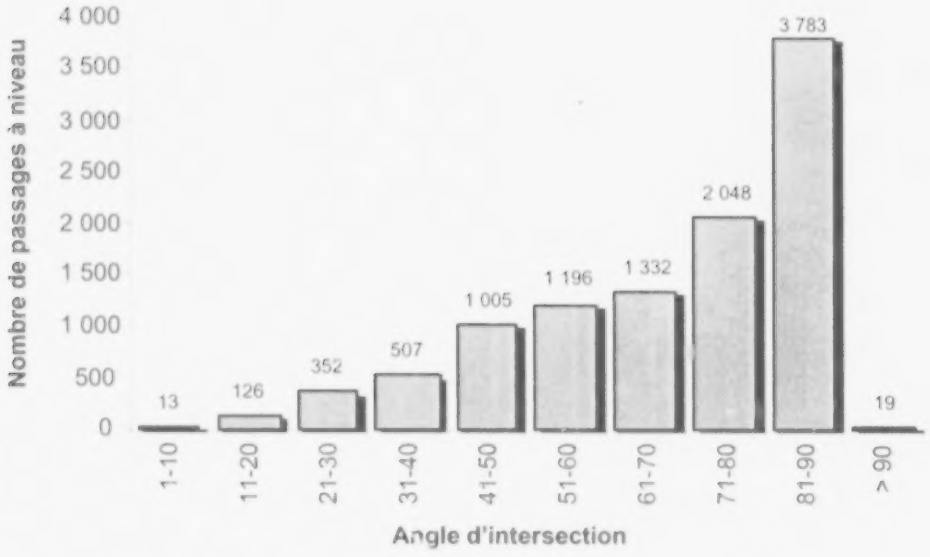


Figure A-1 Répartition de l'échantillon selon l'angle d'intersection

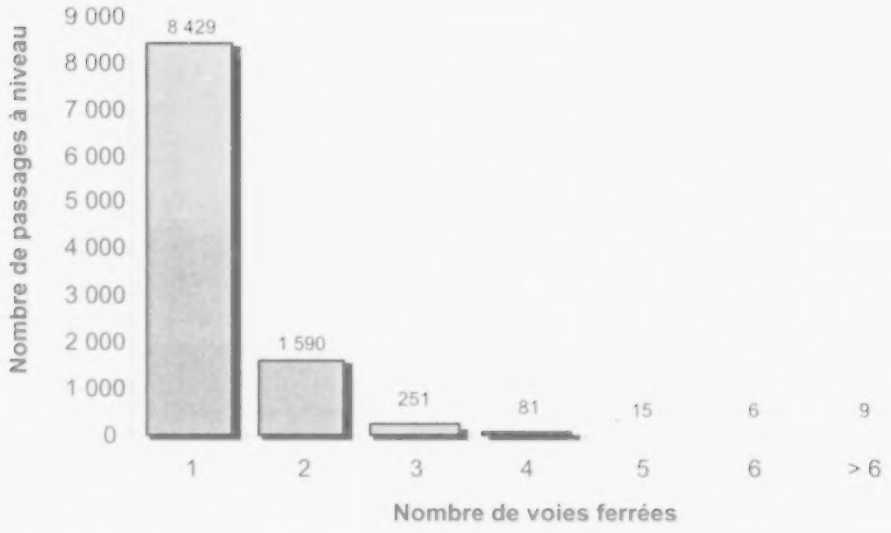


Figure A-2 Répartition de l'échantillon selon le nombre de voies ferrées

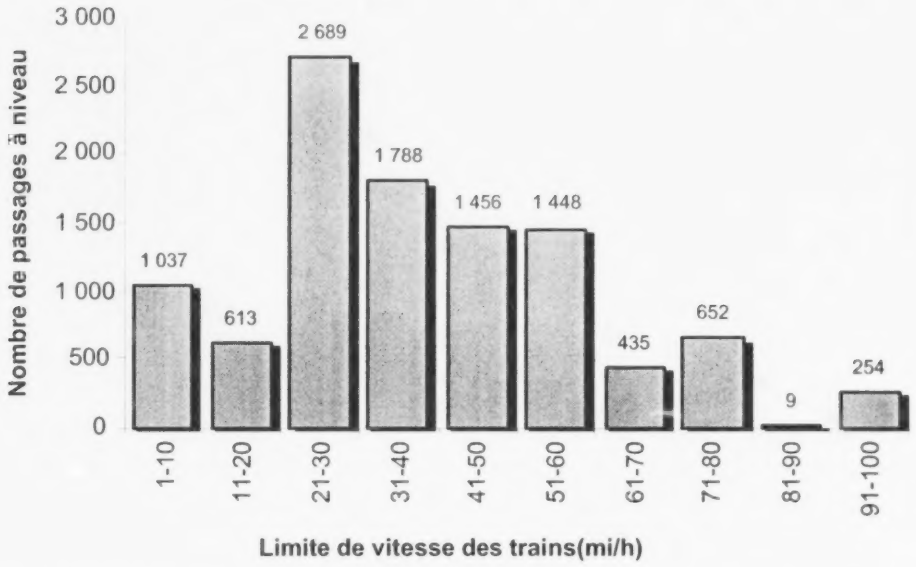


Figure A-3 Répartition de l'échantillon selon la limite de vitesse des trains

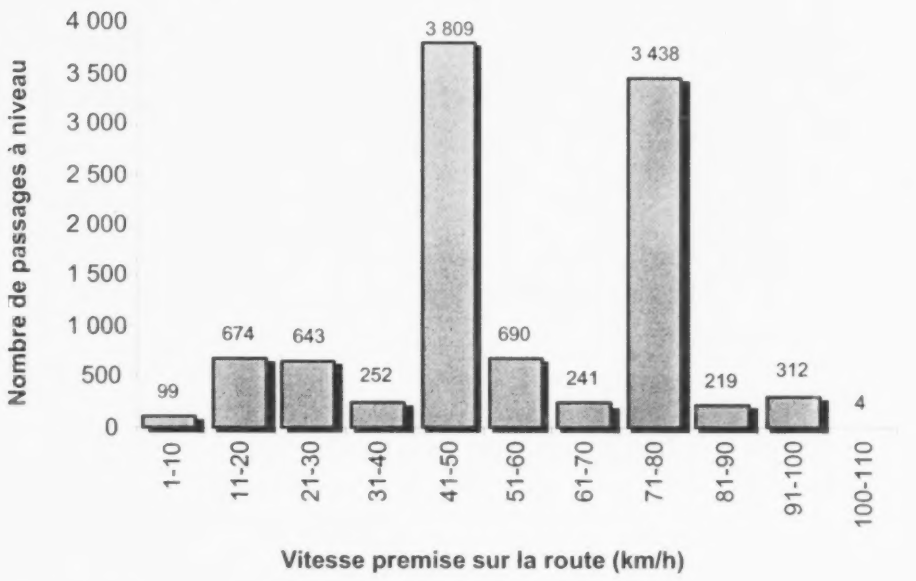


Figure A-4 Répartition de l'échantillon selon la vitesse permise sur la route

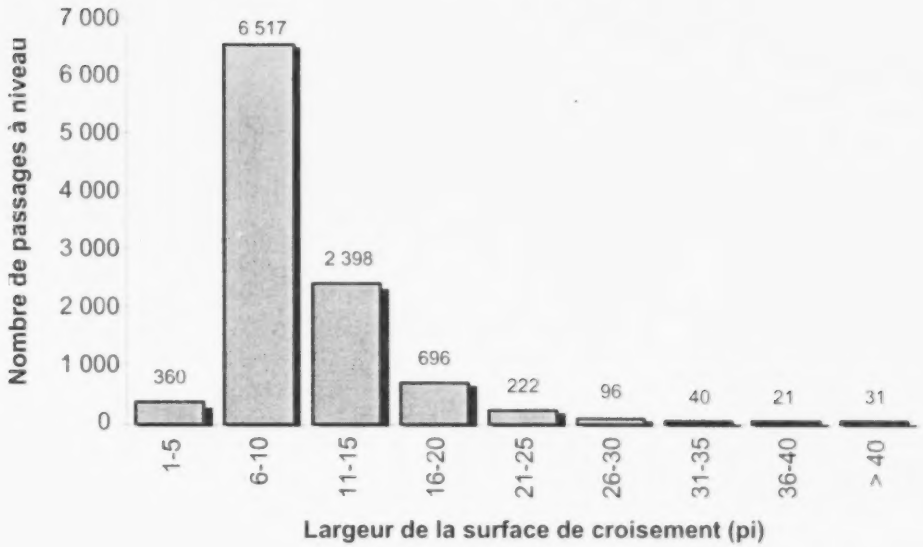


Figure A-5 Répartition de l'échantillon selon la largeur de la surface de croisement

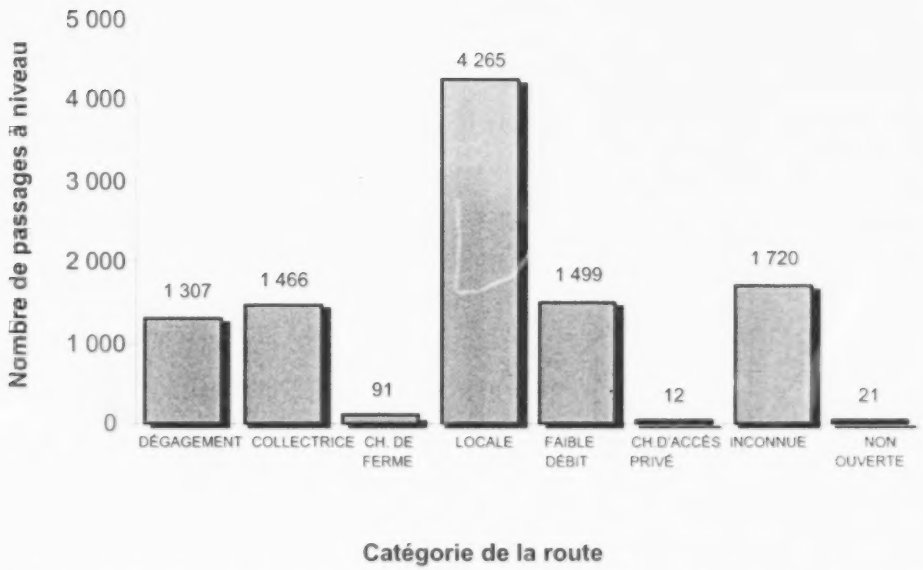


Figure A-6 Répartition de l'échantillon selon la catégorie de la route

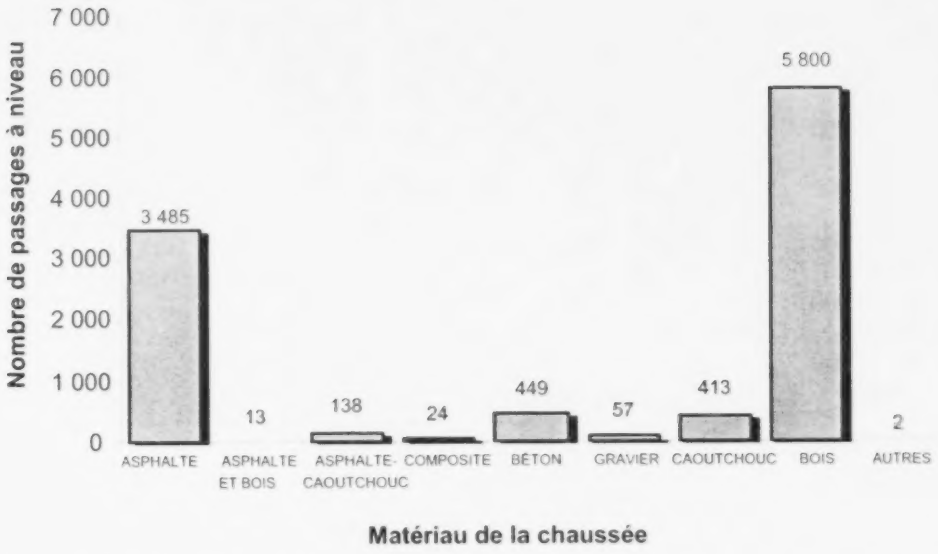


Figure A-7 Répartition de l'échantillon selon le matériau de la chaussée

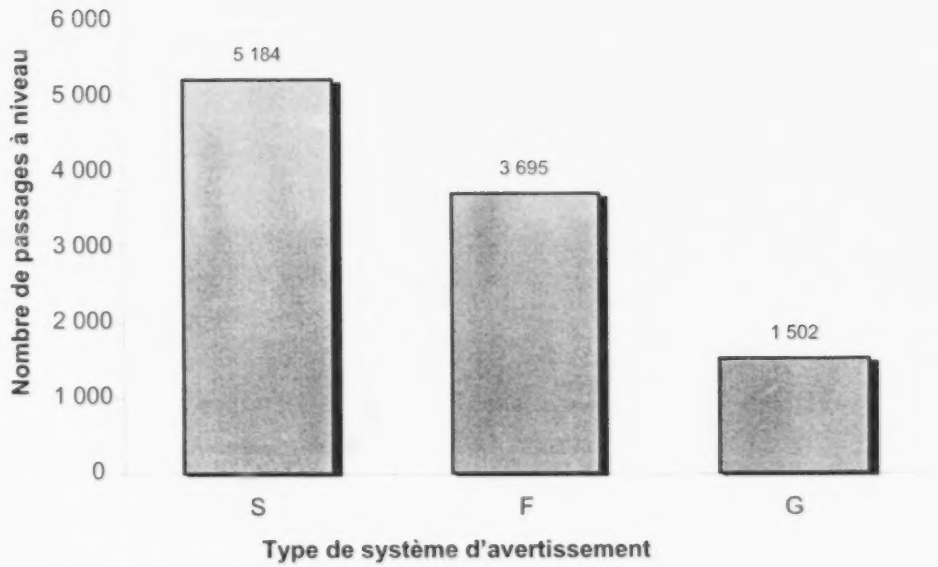


Figure A-8 Répartition de l'échantillon selon le type de système d'avertissement (en 2001)

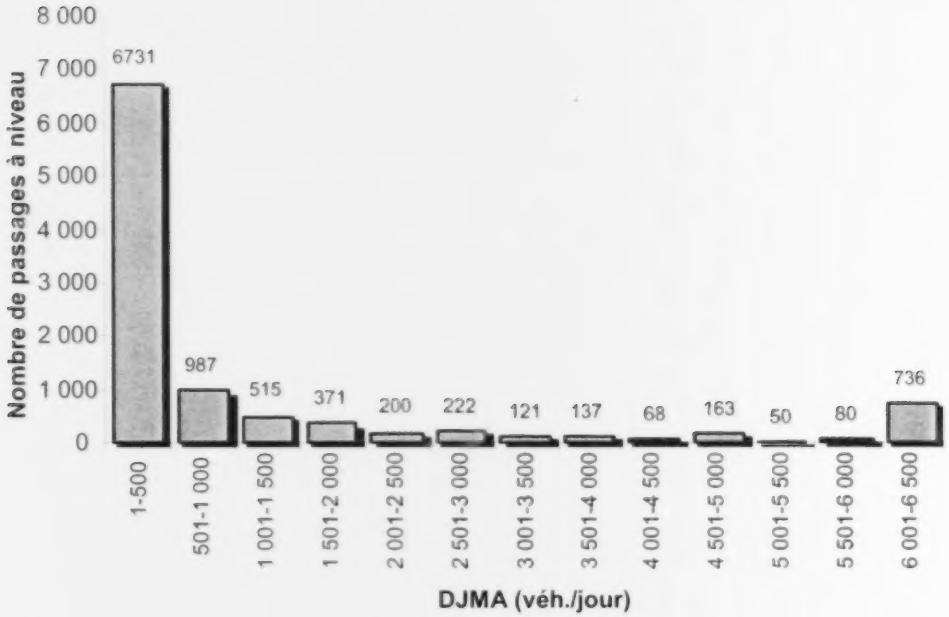


Figure A-9 Répartition de l'échantillon selon le débit journalier moyen annuel

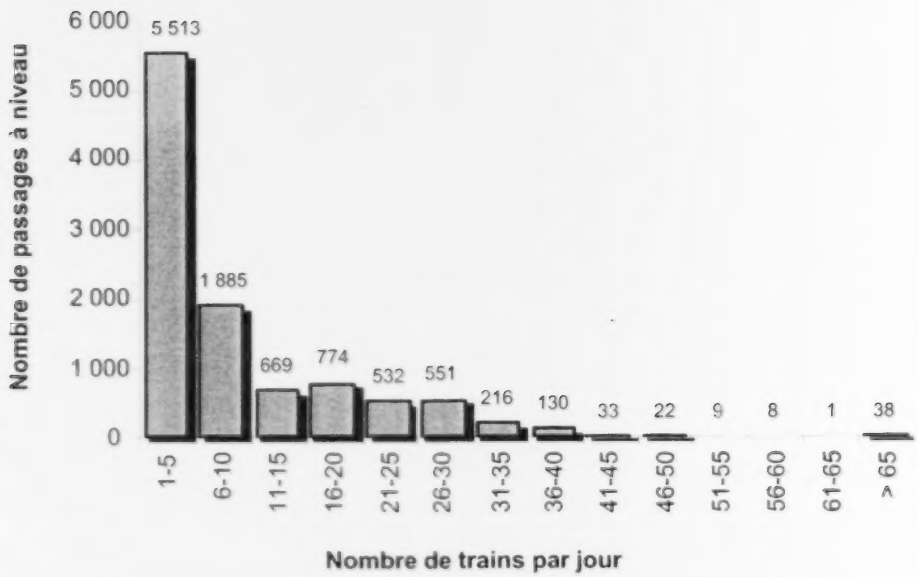


Figure A-10 Répartition de l'échantillon selon le nombre de trains par jour

Centre de développement des transports

800, bd. René-Lévesque Ouest
Bureau 600
Montréal (Québec)
H3B 1X9

www.tc.gc.ca/tdc/index_f.htm